



Pedro Alexandre Dias Teixeira Duarte

Licenciado em Engenharia do Ambiente

**Aumento da autossuficiência energética de uma ETAR com a
implementação conjunta de um regime de co-digestão
anaeróbia e de um sistema solar fotovoltaico em regime de
autoconsumo**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia de Energias Renováveis

Orientador: Dr. João Murta Pina, Professor auxiliar, FCT/UNL

Coorientadora: Dra. Elizabeth D'Almeida Duarte, Professora Catedrática, ISA/UL

Júri:

Presidente: Professora Doutora Anabela Pronto

Arguente: Professora Doutora Rita Fragoso



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2016

Aumento da autossuficiência energética de uma ETAR com a implementação conjunta de um regime de co-digestão anaeróbia e de um sistema solar fotovoltaico em regime de autoconsumo

Copyright © Pedro Alexandre Dias Teixeira Duarte, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

*Dedico a dissertação a todos os motivadores otimistas e à minha irmã que emigrou à procura
de uma vida melhor.*

Agradecimentos

Quero prestar um enorme agradecimento aos meus orientadores, sem o seu apoio a minha iniciativa não poderia ter sucesso.

Sou uma pessoa que ambiciona e certamente alguém que persegue motivações e a minha professora e amiga Dra. Elizabeth D’Almeida Duarte foi e sempre será uma fonte de inspiração para mim. Muito obrigado professora.

O desenvolvimento da dissertação encontrou obstáculos e sofreu alguns contratempos. Não me esquecerei das palavras do professor Dr. João Murta Pina que finalmente definiram o planeamento da dissertação eliminando quaisquer dúvidas: “está perfeito!”. Muito obrigado professor.

Quero agradecer ao coordenador do curso, o professor Dr. Mário Ventim Neves, que sempre se prontificou a ajudar, contribuindo ativamente para a resolução de todas as questões necessárias à concretização do meu percurso.

Declaro o meu apreço e agradecimento à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova que me disponibilizou todos os meios de que dispõe para o desenvolvimento do estudo.

Quero prestar um enorme agradecimento e demonstrar todo respeito e consideração que tenho pelo engenheiro Pedro Póvoa, pela empresa EPAL e por todo o grupo Águas de Portugal. A sua colaboração foi crucial para o desenvolvimento da dissertação.

Agradeço muito à minha coordenadora, a Senhora Dona Rita Eusébio da Câmara Municipal de Oeiras, pela flexibilidade e compreensão demonstradas, permitindo-me conciliar o trabalho com o desenvolvimento da dissertação.

Deixo um agradecimento muito especial à minha namorada que esteve sempre presente quando precisei de desabafar, ouvir uma opinião ou simplesmente de apoio moral. Muito obrigado amor.

“*Last but not least*” agradeço muito à minha família, os meus pais e aos meus irmãos foram incansáveis no apoio e compreensão, principalmente em momentos de maior ansiedade. Agradeço sinceramente o cuidado em não perturbar durante o período despendido no desenvolvimento do estudo.

Resumo

Atualmente, uma estação de tratamento de águas residuais (ETAR) de média/grande dimensão apresenta-se como consumidor intensivo de energia, com um balanço energético consideravelmente negativo. A produção interna de bioenergia cobre apenas uma parte do consumo energético total inerente ao seu funcionamento.

A produção de bioenergia em ETAR resulta de um processo denominado de digestão anaeróbia (DA), que origina biogás (constituído essencialmente por CH_4 e CO_2). O biogás produzido vem sendo utilizado principalmente para produção combinada de energia térmica e elétrica, em grupos de co-geração, direcionada para o autoconsumo da ETAR.

Diversos estudos indicam que o potencial de produção de bioenergia numa ETAR é bastante elevado, podendo mesmo tornar-se um produtor excedentário de energia. A co-digestão anaeróbia apresenta-se como uma solução comprovada para melhorar o rendimento de produção de biogás no processo de DA. Adicionalmente, os sistemas fotovoltaicos apresentam-se como uma solução tecnológica comprovada para produção de energia em regime de autoconsumo.

A presente dissertação propõe a implementação integrada de duas tecnologias de produção de energia renovável, co-digestão anaeróbia e sistema solar fotovoltaico em regime de autoconsumo, contribuindo para o aumento da autossuficiência energética de uma ETAR.

Palavras-chave: ETAR; Autossuficiência energética; Energias Renováveis; Co-digestão anaeróbia; Sistema Fotovoltaico.

Abstract

Currently, a medium/large waste water treatment plant (WWTP) presents itself as an intensive energy consumer, with a considerably negative energy balance. The bioenergy *in situ* production covers only a part of total energy consumption inherent in its operation.

The production of bioenergy WWTP results from a process called anaerobic digestion (AD), which originates biogas (mainly consisting of CH₄ and CO₂). The biogas produced is being used mainly to produce both thermal and electric energy in cogeneration groups targeted for self-consumption.

Several studies indicate that the bioenergy production potential in a WWTP is quite high and may even become a surplus energy producer. The anaerobic co-digestion is presented as a proven solution to enhance biogas production yield in the process. In addition, photovoltaic systems are a robust technological solution to produce energy for self-consumption basis.

This thesis proposes the combined implementation of two renewable energy technologies, anaerobic co-digestion and solar photovoltaic system in self-consumption system, contributing to increased energy self-sufficiency of a WWTP.

Keywords: WWTP; Energy Self-Sufficiency; Renewable energy; anaerobic co-digestion; Photovoltaic system.

Conteúdo

RESUMO.....	I
ABSTRACT.....	III
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS.....	XI
LISTA DE SIGLAS	XIII
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2
CAPÍTULO 2 LITERATURA E ESTADO DA ARTE.....	5
2.1 ENERGIAS RENOVÁVEIS	5
2.1.1 Contexto histórico da energia e a necessidade de mudança do paradigma energético atual.....	5
2.1.2 Desenvolvimento sustentável e energias renováveis.....	6
2.2 ETAR – TRATAMENTOS TÍPICOS, CONSUMOS ENERGÉTICOS E VALORIZAÇÃO DE LAMAS.....	8
2.2.1 Tratamentos típicos de AR em ETAR.....	9
2.2.2 Valorização de lamas geradas em ETAR.....	11
2.2.3 Consumo energético em ETAR.....	11
2.2.4 Efeito de escala na redução do consumo energético em ETAR.....	13
2.2.5 Balanço energético da tecnologia de digestão anaeróbia em ETAR.....	15
2.3 DIGESTÃO ANAERÓBIA	16

2.3.1	<i>Etapas do processo</i>	17
2.3.2	<i>Parâmetros operacionais que influenciam a digestão anaeróbia</i>	19
2.3.3	<i>Reatores Anaeróbios</i>	21
2.3.4	<i>Pré-tratamento de Substratos</i>	23
2.3.5	<i>Co-digestão</i>	26
2.4	TECNOLOGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	27
2.4.1	<i>Composição da célula fotovoltaica</i>	27
2.4.2	<i>Modelo matemático da célula fotovoltaica</i>	28
2.4.3	<i>Tecnologias das células fotovoltaicas</i>	32
2.4.4	<i>Legislação nacional relativa a pequena produção e autoconsumo</i>	33
2.4.5	<i>Custos de implementação de sistemas solares fotovoltaicos</i>	35
2.4.6	<i>Centrais fotovoltaicas implementadas em ETA, em Portugal</i>	36
CAPÍTULO 3 MATERIAL E MÉTODOS		39
3.1	RECOLHA E CARATERIZAÇÃO DO MATERIAL	40
3.1.1	<i>A unidade laboratorial de digestão anaeróbia (ULDA)</i>	40
3.1.2	<i>Recolha e caraterização de Lamas Mistas de ETAR para obtenção de dados relativos à produção de biogás em ULDA</i>	42
3.1.3	<i>Recolha, caracterização e pré-tratamento de co-substratos para obtenção de dados relativos à produção de biogás em regime de co-digestão em ULDA</i>	42
3.1.4	<i>Recolha de dados relativos a consumos energéticos inerentes à tecnologia de digestão anaeróbia em ULDA</i>	43
3.1.5	<i>Recolha de dados relativos a consumos energéticos e produção de biogás referentes à ETAR de Frielas</i>	44
3.2	MÉTODO DE CÁLCULO DAS TARIFAS TETRA-HORÁRIAS SIMPLIFICADAS	47
3.3	MÉTODO DE ELABORAÇÃO DOS CENÁRIOS ENERGÉTICOS EM ESTUDO NA ETAR	48
3.3.1	<i>Tratamento de dados recolhidos na ETAR para elaboração do Cenário Base</i>	49
3.3.2	<i>Elaboração do Cenário Co-digestão</i>	52
3.3.3	<i>Cálculo do consumo específico de energia e autossuficiência energética nos dois cenários energéticos</i>	54
3.4	MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO EM REGIME DE AUTOCONSUMO PARA CADA UM DOS CENÁRIOS ENERGÉTICOS	54
3.4.1	<i>Cálculo dos parâmetros operacionais do módulo fotovoltaico</i>	55
3.4.2	<i>Cálculo da produção fotovoltaica, autoconsumo, Cupac e poupança monetária anuais para os dois cenários energéticos</i>	57
3.4.3	<i>Escolha do inversor e configuração do sistema solar fotovoltaico</i>	58
3.4.4	<i>Cálculo do autoconsumo e da autossuficiência energética dos sistemas fotovoltaicos dimensionados para cada um dos cenários energéticos</i>	59

3.5	CÁLCULO DOS MAPAS DE EXPLORAÇÃO FINANCEIRA E AUTOSSUFICIÊNCIA ENERGÉTICA GERADA NA IMPLEMENTAÇÃO DOS PROJETOS ASSOCIADOS AOS CENÁRIOS ENERGÉTICOS.....	59
3.5.1	<i>Cálculo dos mapas de exploração financeira dos projetos associados aos cenários energéticos</i>	59
3.5.2	<i>Autossuficiência energética gerada com a implementação dos projetos associados aos cenários energéticos</i>	61
CAPÍTULO 4 RESULTADOS – ANÁLISE E DISCUSSÃO		63
4.1	RESULTADOS OBTIDOS EM ULDA RELATIVOS A PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM REGIME DE CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA.	64
4.2	RESULTADOS OBTIDOS EM ULDA RELATIVOS A CONSUMOS ENERGÉTICOS INERENTES À TECNOLOGIA DE DIGESTÃO ANAERÓBIA	65
4.3	CENÁRIO BASE – RESULTADOS RELATIVOS À ETAR DE FRIELAS.....	66
4.3.1	<i>Composição e purificação do biogás produzido.....</i>	67
4.3.2	<i>Produção média de biogás e energia elétrica em co-geração para autoconsumo mensal na ETAR, ao longo do ano de 2014.....</i>	68
4.3.3	<i>Diagrama de carga diário da ETAR em regime de co-geração para autoconsumo, em 2014.....</i>	69
4.3.4	<i>Redução do consumo energético, poupança monetária e autossuficiência energética associados à produção de biogás em regime de co-geração para autoconsumo</i>	70
4.4	CENÁRIO CO-DIGESTÃO – RESULTADOS RELATIVOS À IMPLEMENTAÇÃO DE UM REGIME DE CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA NA ETAR DE FRIELAS.....	72
4.4.1	<i>Benefício resultante da implementação de um regime de co-digestão, em comparação com o regime de digestão anaeróbia simples</i>	73
4.4.2	<i>Diagrama de carga da ETAR em regime de co-digestão anaeróbia</i>	74
4.5	DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO EM REGIME DE AUTOCONSUMO PARA CADA UM DOS CENÁRIOS ENERGÉTICOS	76
4.5.1	<i>Número de módulos PV, potência de pico instalada e características do inversor para cada um dos cenários energéticos.....</i>	76
4.5.2	<i>Produção fotovoltaica, autoconsumo e poupança anuais para os dois cenários</i>	77
4.6	MAPAS DE EXPLORAÇÃO FINANCEIRA E AUTOSSUFICIÊNCIA ENERGÉTICA GERADA NA IMPLEMENTAÇÃO DOS PROJETOS ASSOCIADOS AOS CENÁRIOS ENERGÉTICOS DESENVOLVIDOS PARA A ETAR.	80
4.7	ANÁLISE COMPARATIVA DO BENEFÍCIO RESULTANTE DO PROJETO PROPOSTO.....	83
CAPÍTULO 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHO FUTURO.....		85
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
5.2	PROPOSTA DE TRABALHO FUTURO	86
BIBLIOGRAFIA		89

Índice de Figuras

FIGURA 2.1 – CONSUMO ENERGÉTICO DIÁRIO POR UNIDADE DE TRATAMENTO EM ETAR. FONTE: ADAPTADO DE MENENDEZ & BLACK, 2010.	12
FIGURA 2.2 – BALANÇO ENERGÉTICO POR UNIDADE DE TRATAMENTO EM ETAR. FONTE: ADAPTADO DE MENENDEZ & BLACK, 2010.	13
FIGURA 2.3 – CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA EM 51 ETAR DE GRANDES DIMENSÕES NA REPÚBLICA ESLOVACA. FONTE: ADAPTADO DE BODIK, 2013.	14
FIGURA 2.4 – CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA ORGANIZADO POR GRUPOS DE SEMELHANTE CAUDAL AFLUENTE. FONTE: BODIK, 2013.	14
FIGURA 2.5 – ESQUEMA DE ETAPAS DO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA. FONTE: ADAPTADO DE MULAT, 2015.	17
FIGURA 2.6 – TIPOS DE REATORES ANAERÓBIOS (ADAPTADO DE MARA E HORAN, 2003).	22
FIGURA 2.7 – A) CONSTITUIÇÃO INTERNA DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA TÍPICA; B) CONSTITUIÇÃO PORMENORIZADA DA GRELHA METÁLICA. FONTE: CASTRO 2011.	28
FIGURA 2.8 - CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA QUE ALIMENTA UMA CARGA. FONTE: COUTADA, 2015.	28
FIGURA 2.9 – CURVA I-U GENÉRICA DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA. FONTE: ADAPTADO DE FERREIRA, 2008.	31
FIGURA 2.10 – EXEMPLO DE CÉLULA MONOCRISTALINA. FONTE: GREENPRO, 2004.	32
FIGURA 2.11 – CÉLULA POLICRISTALINA COM ANTIRREFLEXO E FILAMENTOS ELÉTRICOS. FONTE: GREENPRO, 2004	33
FIGURA 2.12 – MÉDIA PONDERADA GLOBAL DO TOTAL DE CUSTOS DE INSTALAÇÃO DE SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS DE MONTAGEM NO SOLO (VALORES BASE DE 2015). FONTE: IRENA ANALYSIS E PHOTON CONSULTING, 2016.	36
FIGURA 3.1 – FLUXOGRAMA ILUSTRATIVO DA ORGANIZAÇÃO SEQUENCIAL DO MATERIAL E MÉTODOS UTILIZADOS.	39

FIGURA 3.2 – UNIDADE LABORATORIAL DE DIGESTÃO ANAERÓBIA DO INSTITUTO SUPERIOR DE AGRONOMIA. FONTE: CARVALHO, ET AL. 2016.	40
FIGURA 3.3 – FOTOGRAFIA DA INSTALAÇÃO DO INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO DE CONSUMOS ELÉTRICOS.	44
FIGURA 3.4 – CONFIGURAÇÃO DA ETAR DE FRIELAS ACOMPANHADA DA RESPECTIVA LEGENDA INDICATIVA DOS EQUIPAMENTOS PARA TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS. FONTE: EPAL.	46
FIGURA 3.5 – CICLO DIÁRIO TETRA-HORÁRIO EM VIGOR NA ETAR. FONTE: EPAL	47
FIGURA 3.6 – FLUXOGRAMA ILUSTRATIVO DO MÉTODO UTILIZADO PARA A ELABORAÇÃO DOS CENÁRIOS ENERGÉTICOS.	48
FIGURA 4.1 – FLUXOGRAMA ILUSTRATIVO DA ORGANIZAÇÃO SEQUENCIAL DOS RESULTADOS APRESENTADOS.	63
FIGURA 4.2 – CONSUMO ELÉTRICO DIÁRIO DE CADA COMPONENTE ANALISADO E CONSUMO ELÉTRICO DIÁRIO TOTAL DA ULDA.	65
FIGURA 4.3 – DIAGRAMA DE CARGA DIÁRIO MÉDIO DA ETAR NO ANO DE 2014.	70
FIGURA 4.4 – IMPACTO DA CO-GERAÇÃO COM BIOGÁS PRODUZIDO NO PROCESSO DE DA SIMPLES NA REDUÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO DA ETAR AO LONGO DO ANO 2014.	71
FIGURA 4.5 – REDUÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL DA ETAR PROPORCIONADA PELA PRODUÇÃO DE ENERGIA EM CO-GERAÇÃO COM BIOGÁS PRODUZIDO NO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA SIMPLES.	71
FIGURA 4.6 – POUPANÇA MONETÁRIA RESULTANTE DA PRODUÇÃO DE ENERGIA EM CO-GERAÇÃO (DA SIMPLES).	72
FIGURA 4.7 – ESTIMATIVA DE REDUÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL DA ETAR PROPORCIONADA PELA IMPLEMENTAÇÃO DE UM REGIME DE CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA.	73
FIGURA 4.8 – ESTIMATIVA DO AUMENTO DE POUPANÇA MONETÁRIA ANUAL RESULTANTE DA IMPLEMENTAÇÃO DE UM REGIME DE CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA.	74
FIGURA 4.9 – DIAGRAMA DE CARGA DIÁRIO MÉDIO DA ETAR (CENÁRIO CO-DIGESTÃO).	75
FIGURA 4.10 – COMPARAÇÃO ENTRE DIAGRAMAS DE CARGA DOS CENÁRIOS DE DIGESTÃO ANAERÓBIA SIMPLES E DE CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA.	75
FIGURA 4.11 – DIMENSIONAMENTO FOTOVOLTAICO DIRECIONANDO TODA A PRODUÇÃO PARA AUTOCONSUMO (CENÁRIO BASE).	77
FIGURA 4.12 – DIMENSIONAMENTO FOTOVOLTAICO DIRECIONANDO TODA A PRODUÇÃO PARA AUTOCONSUMO (CENÁRIO CO-DIGESTÃO).	78
FIGURA 4.13 – CASH-FLOW ACUMULADO (CENÁRIO BASE).	81
FIGURA 4.14 – AUTOSSUFICIÊNCIA ENERGÉTICA GERADA NO TEMPO DE VIDA DO SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO EM REGIME DE AUTOCONSUMO NO CENÁRIO BASE.	81
FIGURA 4.15 – CASH-FLOW ACUMULADO (CENÁRIO CO-DIGESTÃO).	82
FIGURA 4.16 – AUTOSSUFICIÊNCIA ENERGÉTICA GERADA NO TEMPO DE VIDA DO PROJETO DE IMPLEMENTAÇÃO CONJUNTA DO REGIME DE CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA E DO SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO (CENÁRIO CO-DIGESTÃO).	82

Índice de Tabelas

TABELA 2.1 – NÍVEIS DE TRATAMENTO DAS FASES LÍQUIDA E SÓLIDA EM ETAR ACOMPANHADOS DE DESCRIÇÃO, OPERAÇÕES E PROCESSOS. FONTE: ADAPTADO DE ALVES, 2013.....	10
TABELA 2.2 – CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA POR GRUPOS DE TRATAMENTO (MECÂNICO, BIOLÓGICO E MANUSEAMENTO DE LAMAS) E PERCENTAGEM DO CONSUMO ENERGÉTICO TOTAL EM ETAR. FONTE: ADAPTADO DE HOPKOWICZ, 2000.	15
TABELA 2.3 – BALANÇO ENERGÉTICO DO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA COM APLICAÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO EM UNIDADE DE CO-GERAÇÃO, NA ETAR DE NOWY SĄCZ. FONTE: ADAPTADO DE HOPKOWICZ, 2000.	16
TABELA 2.4 – PARÂMETROS OPERACIONAIS ASSOCIADAS A CADA TIPO DE REATOR ANAERÓBIO. FONTE: ADAPTADO DE MARA E HORAN, 2003.....	22
TABELA 2.5 – CUSTO DE IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INSTALADOS EM QUATRO PAÍSES DA EUROPA, EM 2014. FONTE: IEA.	35
TABELA 3.1 – CARATERIZAÇÃO DAS LAMAS MISTAS DE ETAR (CENÁRIO DE REFERÊNCIA). FONTE: ULDA DO INSTITUTO SUPERIOR DE AGRONOMIA (PROFESSORA ELIZABETH D’ALMEIDA DUARTE)	42
TABELA 3.2 – CARATERIZAÇÃO DOS CO-SUBSTRATOS SELECIONADOS PARA CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA (ENSAIO DE CO-DIGESTÃO). FONTE: ULDA DO INSTITUTO SUPERIOR DE AGRONOMIA (PROFESSORA ELIZABETH D’ALMEIDA DUARTE).....	43
TABELA 3.3 – PERÍODOS HORÁRIOS E TARIFAS ASSOCIADAS COMPREENDIDOS NA TARIFA TETRA-HORÁRIA. FONTE: EPAL	47
TABELA 3.4 – PRESSUPOSTOS ASSOCIADOS À PRODUÇÃO DE ENERGIA COM BIOGÁS EM REGIME DE CO-GERAÇÃO PARA AUTOCONSUMO. FONTE: EPAL.	49
TABELA 3.5 – CARATERÍSTICAS DO MÓDULO FOTOVOLTAICO SELECIONADO. FONTE: PVSYST.	55

TABELA 3.6 – CUSTOS DE IMPLEMENTAÇÃO DO REGIME DE CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA. FONTE: UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – CO-DIGESTION ECONOMIC ANALYSIS TOOL (CoEAT).	60
TABELA 4.1 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE REFERÊNCIA E DE CO-DIGESTÃO. COMPARAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS OPERACIONAIS CORRESPONDENTES.	64
TABELA 4.2 – REQUERIMENTOS DE REMOÇÃO DE H₂S, DE ACORDO COM A UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS. FONTE: SZMIDT, ET AL. 2013.	67
TABELA 4.3 – COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO ANTES E DEPOIS DO SISTEMA DE PURIFICAÇÃO. FONTE: EPAL.	67
TABELA 4.4 – PRODUÇÃO DE BIOGÁS E DE ENERGIA ELÉTRICA EM CO-GERAÇÃO, NO ANO DE 2014. FONTE: ÁGUAS DE PORTUGAL. AGRADECIMENTO: EPAL.	68
TABELA 4.5 - MÉDIA MENSAL DE POTÊNCIA ATIVA (kW) E SOMATÓRIO MENSAL DE CONSUMOS ENERGÉTICOS (kWh) EM 2014. FONTE: EPAL.	69
TABELA 4.6 – CARATERÍSTICAS DO INVERSOR SELECIONADO PARA O CENÁRIO BASE. FONTE: SMA. .	76
TABELA 4.7 – CARATERÍSTICAS DO INVERSOR SELECIONADO PARA O CENÁRIO BASE. FONTE: SMA. .	77
TABELA 4.8 – PARÂMETROS MAIS IMPORTANTES REFERENTES AO SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO DIMENSIONADO PARA CADA UM DOS CENÁRIOS ENERGÉTICOS EM ESTUDO.	79
TABELA 4.9 – INDICADORES FINANCEIROS ASSOCIADOS AOS MAPAS DE EXPLORAÇÃO DESENVOLVIDOS PARA OS CENÁRIOS ENERGÉTICOS.	83

Lista de siglas

AC – *Alternate Current* (corrente alternada)

AGV – Ácidos gordos voláteis.

AR – Água Residual.

C/N – Razão carbono/azoto.

CE – Condutividade elétrica.

CQO – Carência química de oxigénio.

DA – Digestão anaeróbia.

DC – *Direct Current* (corrente contínua).

ETA – Estação de tratamento de água.

ETAR – Estação de tratamento de águas residuais.

FER – Fontes de energia renovável.

FF – Fator de forma.

GEE – Gases de efeito de estufa.

GNL – Gás Natural Liquefeito.

GPR – *Gas production rate* (taxa de produção de gás).

HE – Habitantes equivalentes.

NCS – *Number of cells in series* (número de células em série).

NOCT – *Nominal operating cell temperature* (temperatura nominal de operação da célula).

OLR – *Organic loading rate* (taxa de carga orgânica).

OMIE – Operador do mercado Ibérico de energia.

P_{ac} – Produção fotovoltaica em AC.

PCI – Poder calorífico inferior.

PRI – Período de retorno do investimento.

PV – Photovoltaic (fotovoltaico).

RESP – Rede elétrica de serviço público.

SEN – Sistema Elétrico de Energia.

SGP – *Specific gas production* (produção específica de gás).

SST – Sólidos suspensos totais.

STC – *Standard test conditions*.

SVT – Sólidos voláteis totais.

TIR – Taxa interna de rentabilidade.

TRH – Tempo de retenção hidráulico.

TRS – Tempo de retenção de sólidos.

UE – União Europeia.

ULDA – Unidade laboratorial de digestão anaeróbia.

UPAC – Unidades de produção para autoconsumo.

UPP – Unidades de pequena produção.

VAL – Valor atual líquido.

Capítulo 1 Introdução

1.1 Motivação

A elaboração da presente dissertação é motivada pela premissa de que uma estação de tratamento de águas residuais (ETAR) tem o potencial de se tornar um produtor excedentário de bioenergia renovável, ou seja, com capacidade de produzir mais energia do que a utilizada internamente.

A produção de bioenergia em ETAR resulta de um processo denominado de digestão anaeróbia (DA), onde ocorre degradação da matéria orgânica biodegradável constituinte das lamas geradas no processo de tratamento de água residual, originando biogás (constituído essencialmente por CH_4 e CO_2). O biogás produzido vem sendo utilizado principalmente para produção combinada de energia térmica e elétrica, em grupos de co-geração, direcionada para o autoconsumo da ETAR. Assim, o biogás é considerado um combustível renovável e a ETAR uma fonte produtora desse mesmo combustível.

No entanto, atualmente as ETAR apresentam um balanço energético consideravelmente negativo, onde a produção interna de bioenergia aplicada maioritariamente em unidades de co-geração cobre apenas uma parte do consumo energético total inerente ao seu funcionamento.

Portanto, apenas a tomada de medidas a implementar numa ETAR de média/grande dimensão podem contribuir para a redução do consumo energético associado ao aumento de produção interna de energia, no sentido de aumentar a autossuficiência energética da instalação.

A integração de tecnologias de energia renovável visando o aumento de produção de energia para autoconsumo apresenta-se como uma solução com potencial de viabilidade económica para aumentar a autossuficiência energética em ETAR.

A co-digestão anaeróbia apresenta-se como uma solução comprovada para melhorar o rendimento de produção de biogás no processo de DA. Adicionalmente, os sistemas fotovoltaicos apresentam-se como uma solução tecnológica robusta para produção de energia em regime de autoconsumo.

1.2 Objetivos

O objetivo inerente à motivação impulsionadora da presente dissertação é o de aumentar a percentagem de autossuficiência de uma ETAR, na intenção de dar um passo importante no caminho da autossuficiência energética deste tipo de instalações.

Neste sentido, serão recolhidos e tratados os dados considerados necessários para apurar as informações relevantes que servirão de base para o desenvolvimento do presente estudo, que visa desenvolver e analisar um cenário de implementação de um regime de co-digestão anaeróbia e de um sistema solar fotovoltaico em regime de autoconsumo, numa ETAR que atualmente realiza digestão anaeróbia de lamas mistas para produção de biogás e aplicação em grupos de co-geração.

As soluções tecnológicas propostas para futura implementação visam reduzir a necessidade de energia elétrica proveniente da rede elétrica de serviço público (RESP), aumentando a produção de energia destinada ao autoconsumo.

1.3 Organização da dissertação

Seguidamente serão apresentados os pontos-chave da organização do presente estudo:

- Capítulo 2 – Literatura e estado de arte: contexto histórico, político e legislativo das energias renováveis; tratamentos típicos e consumo energético em ETAR; tecnologia de digestão anaeróbia e tecnologia solar fotovoltaica.
- Capítulo 3 – Material e métodos: recolha de dados relativos a consumos energéticos e produção de biogás, em laboratório e em ETAR e métodos utilizados para elaboração de cenários energéticos, dimensionamento de sistema solar fotovoltaico e cálculo de mapas de exploração de investimento.
- Capítulo 4 – Análise e discussão dos resultados obtidos.
 - Subcapítulos 4.1 e 4.2 – Análise e discussão dos resultados obtidos em laboratório relativos a produção de biogás em regime de co-digestão e consumos energéticos associados ao processo de digestão anaeróbia.

- Subcapítulo 4.3 – Elaboração do cenário energético base da ETAR com base no tratamento dos dados recolhidos. Análise e discussão dos resultados obtidos.
- Subcapítulo 4.4 – Elaboração do cenário energético de co-digestão para a ETAR com base no aumento de produção de biogás em regime de co-digestão apurado em laboratório. Análise e discussão dos resultados obtidos.
- Subcapítulo 4.5 – Dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico em regime de autoconsumo para cada um dos cenários elaborados.
- Subcapítulo 4.6 – Mapa de exploração do investimento e autossuficiência energética associados aos projetos de implementação inerentes aos dois cenários realizados.
- Subcapítulo 4.7 – Análise e discussão do benefício resultante das medidas propostas.
- Capítulo 5 – Considerações finais e sugestões que visam dar continuidade no futuro ao estudo iniciado na presente dissertação.

Capítulo 2 Literatura e estado da arte

2.1 Energias Renováveis

O presente subcapítulo desenvolve uma breve introdução à problemática do setor da energia no mundo, efetuando um enquadramento histórico da energia que explica a necessidade de mudança do paradigma energético atual. Seguidamente é explicado o conceito de desenvolvimento sustentável e de energias renováveis. Discute-se a transição do paradigma energético de fontes de energia fóssil para fontes de energia renovável e medidas políticas tomadas nesse sentido.

2.1.1 Contexto histórico da energia e a necessidade de mudança do paradigma energético atual

Verifica-se uma interligação entre a história da humanidade e as sucessivas revoluções energéticas, com a energia como protagonista no desenvolvimento económico e social. A revolução industrial criou no mercado energético e na sociedade a dependência da extração e queima de combustíveis fósseis, principalmente petróleo, carvão e gás natural, para produção de energia (Jesus, 2011).

O carvão foi a principal fonte de energia a suportar o processo de industrialização no século XIX, com a sua produção a aumentar de cerca de 10 para 1000 milhões de toneladas por ano. A exploração intensiva de petróleo começou em 1853, com a descoberta do processo da destilação em querosene, economicamente mais vantajoso quando comparado com os óleos usados na altura. A segunda metade do século XIX ficou marcada por descobertas como o método da extração de petróleo do subsolo e os motores de combustão interna. No início do século XX os automóveis foram-se tornando de cada vez mais comuns, aumentando proporcionalmente a procura de petróleo. Na segunda década do século XX surge a produção em série, por Henry Ford, que

revolucionou o setor dos transportes e da indústria. O século XX foi caracterizado por grandes avanços tecnológicos e desenvolvimentos sociais que foram suportados pela exploração do petróleo, que atualmente se manifesta como a maior fonte de energia. A exploração do gás natural também evoluiu, particularmente no período pós-guerra, começando a ser utilizado a partir de 1950 (Lavado, 2009; Silva, 2012).

Depois da Grande Depressão de 1929 o consumo de energia cresceu drasticamente. Depois da Segunda Guerra Mundial o consumo de gás natural cresceu, seguido da energia nuclear na década de 60, continuando o carvão e o petróleo como combustíveis dominantes. Atualmente, a energia proveniente de combustíveis fósseis cobre aproximadamente 85% da procura mundial de energia primária (Quaschnig, 2016).

A desvantagem mais reconhecida dos combustíveis fósseis é a emissão de CO₂ na sua combustão. Apesar de parte do mesmo se dissolver nos oceanos ou ser absorvido pelas plantas por meio da fotossíntese, a outra parte acumula-se na atmosfera, alterando a sua composição e, por ser um GEE, tende a provocar o aumento da temperatura média global e a tornar mais frequentes os fenómenos climáticos extremos, para além de outras consequências (Twidell & Weir, 2015).

Jesus (2011) cita a International Energy Agency, afirmando que o atual modelo energético baseado na produção energética a partir de combustíveis fósseis é ambiental, social e economicamente insustentável, criando a necessidade de alteração desta tendência. Assim, enfrenta-se novamente a necessidade de alterar o nosso paradigma energético.

2.1.2 Desenvolvimento sustentável e energias renováveis

O conceito de desenvolvimento sustentável pode ser definido por viver, produzir e consumir correspondendo às necessidades do presente sem comprometer as gerações futuras. Este conceito tornou-se um princípio chave no século XXI. Alcançou importância global em 1987 no relatório do seminário da *World Commission on Environment and Development* das Nações Unidas (Twidell & Weir, 2015).

Fontes de energia são consideradas renováveis se forem infinitas dentro de um período de tempo considerado relevante para a humanidade. A energia renovável pode ser dividida em três grandes grupos: solar, planetária e geotérmica. A disponibilidade anual de energia renovável, considerando a totalidade da energia contida nas suas fontes, ultrapassa largamente a procura

global de energia. Teoricamente, as renováveis podiam facilmente cobrir a procura global de energia (Quaschnig, 2016).

No entanto, a transição do paradigma energético baseado em combustíveis fósseis para um novo paradigma assente em energias renováveis necessita de uma mudança completa no setor da energia que veio a ser construído durante as décadas passadas. O grande desafio das energias renováveis é a necessidade de garantir a disponibilidade de energia, combatendo as flutuações verificadas na produção. Uma solução é o armazenamento de energia a larga escala. Outra solução passa pela gestão do transporte e procura globais da energia, ajustando o consumo ao fornecimento. Assim, a questão atualmente não passa por perceber quando é que as energias renováveis vão garantir todo o fornecimento global mas sim qual a quota que cada fonte de energia renovável terá (e quão depressa) no sentido de mitigar os efeitos provocados pelos GEE (Quaschnig, 2016).

Uma análise aos custos totais da obtenção de matéria-prima combustível, incluindo externalidades negativas que contabilizem a natureza finita dos combustíveis fósseis e nucleares, os danos das emissões poluentes e a sustentabilidade ecológica, permite concluir que a combinação de energias renováveis com o uso eficiente da energia é mais rentável do que o uso tradicional dos combustíveis fósseis e nucleares, sendo a energia renovável muito mais compatível com o desenvolvimento sustentável pretendido. Neste sentido quase todos os planos nacionais para a energia incluem quatro fatores vitais para melhoramento e manutenção do benefício proveniente da energia (Twidell & Weir, 2015):

1. Aumentar o aproveitamento de fontes renováveis;
2. Aumentar a eficiência das fontes e da utilização final dos recursos;
3. Reduzir a poluição;
4. Considerar a empregabilidade, segurança e estilo de vida da população.

Segundo o Pacote Energia-Clima 20/20/20, aprovado em dezembro de 2008, os 27 países da União Europeia, face aos registos de 1990, deverão chegar a 2020 com menos 20% de emissões de GEE, mais 20% de energias renováveis no consumo energético global e menos 20% de consumo energético resultante do aumento da eficiência (Jesus, 2011).

O último quadro de ação relativo ao clima e à energia foi apresentado pela Comissão Europeia em 22 de janeiro de 2014. Define políticas e objetivos para a União Europeia, a executar no período entre 2020 e 2030.

O quadro de ação para 2030 visa tratar questões como (Conselho da União Europeia, 2015):

- Redução das emissões de GEE em 80-95% até 2050 relativamente ao nível de 1990.
- Os elevados preços da energia e a vulnerabilidade da economia da UE a futuros aumentos de preços, em especial do petróleo e do gás.
- A dependência das importações de energia na UE, muitas vezes provenientes de zonas politicamente instáveis.
- A necessidade de substituir e modernizar a infraestrutura energética e de definir um quadro regulamentar estável para potenciais investidores.
- A necessidade de a UE acordar um objetivo de redução das emissões de gases com efeito de estufa para 2030, no contexto do seu contributo para as próximas negociações de um novo acordo mundial sobre as alterações climáticas.

São propostas, principalmente, as seguintes ações:

- Redução das emissões de GEE em 40% até 2030 relativamente aos níveis de 1990.
- Pelo menos 27% do consumo energético proveniente de energias renováveis, com margem de flexibilidade suficiente para permitir aos Estados-Membros definir metas nacionais.
- Melhoria da eficiência energética por meio de possíveis alterações à diretiva relativa à eficiência energética.
- Indicadores-chave sobre os preços da energia, a diversificação do aprovisionamento, as interligações entre os Estados-Membros e a evolução tecnológica para medir o progresso com vista a um sistema energético mais competitivo, seguro e sustentável.

2.2 ETAR – Tratamentos típicos, consumos energéticos e valorização de lamas

Serão abordados os tratamentos de águas residuais tipicamente praticados em ETAR e os consumos energéticos inerentes aos mesmos. Será analisado o processo de digestão anaeróbia para valorização de lamas em ETAR visando a produção interna de energia.

2.2.1 Tratamentos típicos de AR em ETAR

Águas residuais (AR) são uma combinação de líquidos residuais cuja qualidade foi degradada. São provenientes principalmente de residências, instituições, estabelecimentos comerciais e industriais (Oliveira, 2014).

As ETAR são sistemas de saneamento que processam o tratamento necessário para diminuir a carga poluente das AR, de modo a que possam ser descarregadas nos cursos de água sem risco de contaminação (Alves, 2013). Representam uma grande importância na sociedade e o desenvolvimento na procura de novos métodos de tratamento e no aumento da eficiência dos já existentes tem sido constante (Pinto, 2015).

O tratamento de águas residuais em ETAR é constituído por três fases: líquida, sólida e gasosa. A fase líquida, considerada a mais importante no processo de remoção de contaminantes, geralmente divide-se em quatro níveis de tratamento: preliminar, primário, secundário e terciário. A fase sólida, resulta dos subprodutos que vão sendo extraídos ao longo da fase líquida e a fase gasosa resulta dos subprodutos das fases anteriores (Alves, 2013).

Os níveis de tratamento inerentes às fases líquida e sólida serão sintetizados na Tabela 2.1, que apresenta os níveis de tratamento com respetiva descrição, operações e processos frequentemente utilizados em ETAR.

Tabela 2.1 – Níveis de tratamento das fases líquida e sólida em ETAR acompanhados de descrição, operações e processos. Fonte: Adaptado de Alves, 2013.

Nível de tratamento	Descrição	Operações e Processos
Preliminar (fase líquida)	Remoção de sólidos grosseiros.	<ul style="list-style-type: none"> • Gradagem. • Desarenação. • Homogeneização e armazenamento. • Separação de óleos e gorduras.
Primário (fase líquida)	Remoção de sólidos suspensos e matéria orgânica.	<ul style="list-style-type: none"> • Químico: neutralização • Físico: flotação, decantação e filtração.
Secundário (fase líquida)	Remoção da maioria da matéria orgânica por processos biológicos (aeróbios e anaeróbios) e físico-químicos.	<ul style="list-style-type: none"> • Filtração. • Lamas ativadas. • Leitos percoladores. • Discos biológicos. • Lagoas anaeróbias. • Lagoas aeróbias. • Lagoas de estabilização. • Decantação.
Terciário (fase líquida)	Remoção de sólidos suspensos dissolvidos, nutrientes e compostos tóxicos.	<ul style="list-style-type: none"> • Decantação. • Filtração. • Adsorção sobre carvão. • Troca iônica. • Osmose inversa. • Desinfecção.
Tratamento de Lamas (fase sólida)	Estabilização e redução do volume de lamas geradas no processo de tratamento de AR. Remoção de sólidos orgânicos e organismos patogênicos.	<ul style="list-style-type: none"> • Espessamento. • Digestão anaeróbia. • Desidratação. • Higienização.

2.2.2 Valorização de lamas geradas em ETAR

A estabilização de lamas por via anaeróbia é um processo denominado de digestão anaeróbia que envolve a degradação de matéria orgânica biodegradável presente nas lamas resultantes do tratamento de AR num reator anaeróbio (em condições de ausência de oxigénio). A decomposição da matéria orgânica é efetuada por bactérias anaeróbias, cujos produtos do metabolismo compõem uma mistura gasosa denominada biogás (Alves, 2013).

O metano presente no biogás confere-lhe conteúdo energético, que pode ser utilizado como forma de energia renovável, permitindo a sua utilização como combustível gasoso em diversas aplicações (Alves, 2013; Oliveira 2014).

O processo anaeróbio permite a obtenção de uma lama digerida com uma quantidade de nutrientes consideráveis. Durante o processo de digestão, os nutrientes inicialmente presentes na forma orgânica sofrem mineralização, apresentando-se assim no produto final numa forma mais facilmente assimilável pelas plantas. Desta forma as lamas digeridas devem ser caracterizadas do ponto de vista agronómico, podendo ser aplicadas em solo agrícola como fertilizante (Alves, 2013; Oliveira 2014; Leonardo, 2012).

2.2.3 Consumo energético em ETAR

O grande problema associado às ETAR é o elevado consumo energético inerente ao funcionamento dos equipamentos de tratamento, transporte e bombagem de água residual (Pinto, 2015). As Figuras 2.1 e 2.2 apresentam, respetivamente, a percentagem média de consumo energético e o balanço do consumo energético (kWh/dia) por tratamento praticado, num estudo desenvolvido para uma ETAR com tratamento convencional por lamas ativadas que trata cerca de 37850 m³/dia, equivalente a uma ETAR de média dimensão. São apresentados os principais processos que contribuem para o elevado consumo energético na ETAR.

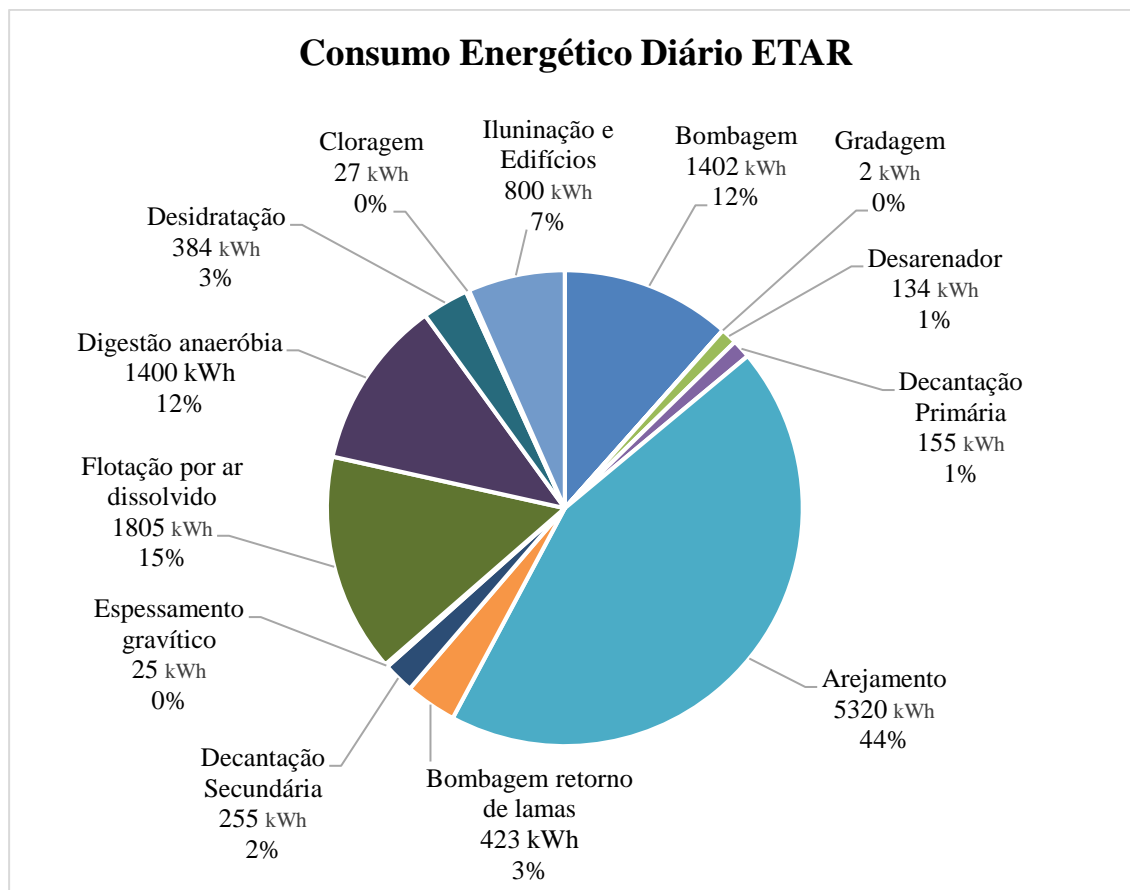


Figura 2.1 – Consumo energético diário por unidade de tratamento em ETAR. Fonte: Adaptado de Menendez & Black, 2010.

A etapa de tratamento que representa maior consumo energético é o arejamento (44%) devido ao contínuo fornecimento de oxigénio necessário para o tratamento biológico. A digestão anaeróbia é responsável por 12% do consumo energético devido principalmente à necessidade de aquecimento das lamas no reator de DA para o crescimento dos microrganismos anaeróbios, que depende da manutenção de uma determinada gama de temperaturas.

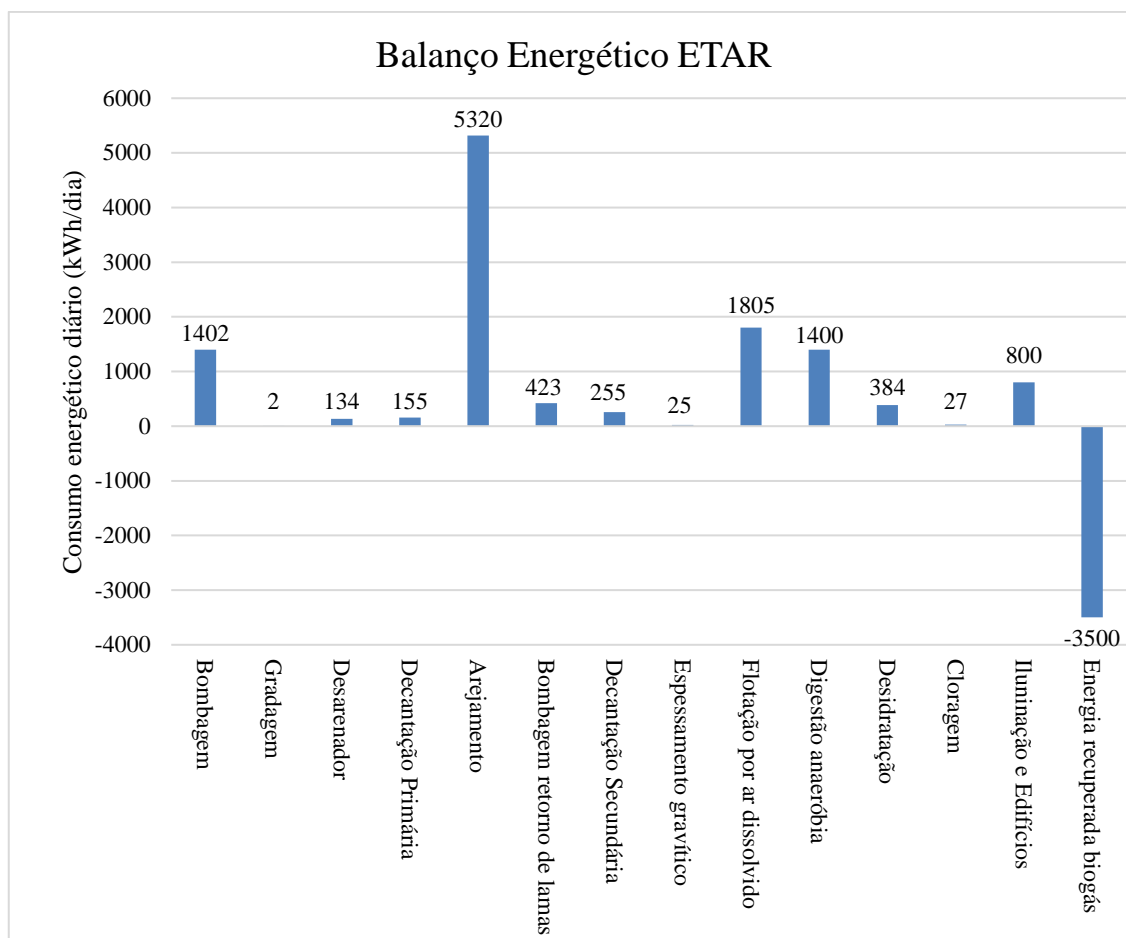


Figura 2.2 – Balanço Energético por unidade de tratamento em ETAR. Fonte: Adaptado de Menendez & Black, 2010.

A Figura 2.2 permite verificar que o balanço energético na ETAR é consideravelmente negativo, com a energia recuperada pela produção de biogás a representar cerca de 29% da totalidade da energia consumida.

2.2.4 Efeito de escala na redução do consumo energético em ETAR

Segundo Bodik, 2013, num estudo desenvolvido na República Eslovaca envolvendo 51 ETAR foram consumidos 105 GWh de energia em 2011.

A Figura 2.3 apresenta o consumo específico de energia verificado nas 51 ETAR de grandes dimensões, com uma média de 490.000 habitantes equivalentes (HE) por ETAR. O consumo específico variou num intervalo de 0,145-1,422 kWh/m³, apresentando uma média de 0,485 kWh/m³. O consumo energético em ETAR na República Eslovaca é comparável com o verificado noutros países (Bodik, 2013).

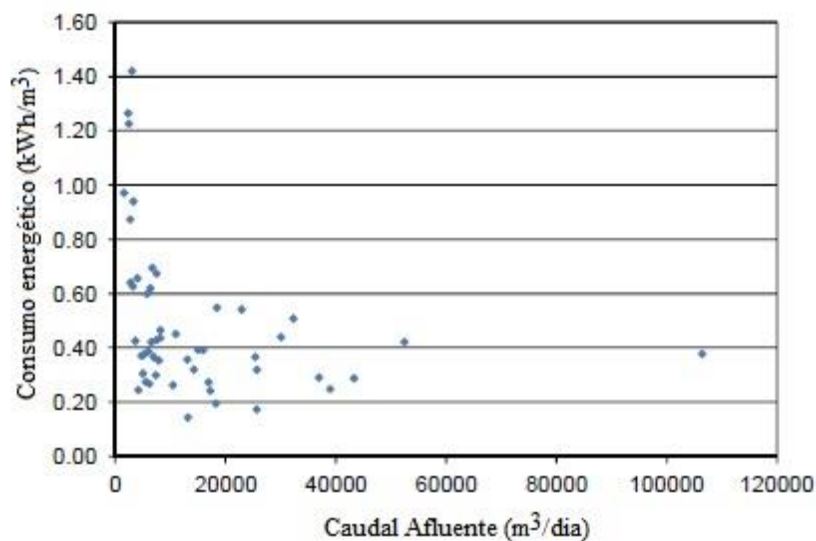


Figura 2.3 – Consumo específico de energia em 51 ETAR de grandes dimensões na República Eslovaca. Fonte: Adaptado de Bodik, 2013.

O consumo específico de energia normalmente decresce com o aumento de caudal afluyente à ETAR. As 13 ETAR de menores dimensões, com caudal afluyente inferior a 5000 m³/dia, apresentam mais elevados consumos específicos de energia, com uma média de 0,768 kWh/m³. Tal situação pode ser explicada por diversos fatores, mas um dos principais explica-se com o reduzido caudal afluyente à ETAR contrariamente à maior capacidade de tratamento inicialmente projetada (Bodik, 2013).

Na Figura 2.4 pode visualizar-se que ETAR de maiores dimensões apresentam consumos de energia muito mais eficientes comparativamente com pequenas estações, sendo que o grupo de ETAR com caudal afluyente superior a 5000 m³/dia apresenta consumos específicos entre 0,331-0,414 kWh/m³ (Bodik, 2013).

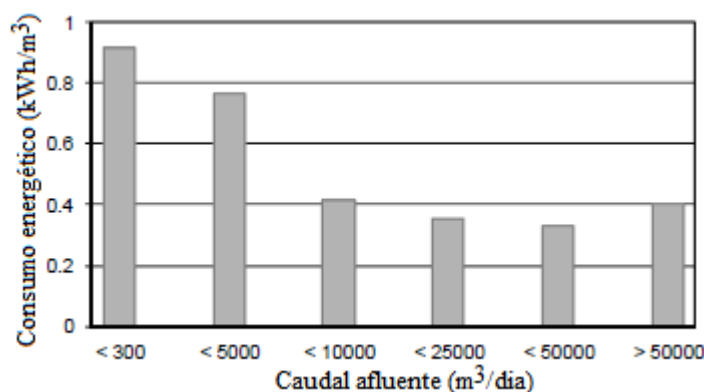


Figura 2.4 – Consumo específico de energia organizado por grupos de semelhante caudal afluyente. Fonte: Bodik, 2013.

A Tabela 2.2 apresenta um exemplo retirado de um estudo desenvolvido para a ETAR da cidade de Nowy Sącz na Polónia, referindo o consumo específico de energia por grupos de tratamento (mecânico, biológico e manuseamento de lamas) em ETAR e percentagem do consumo energético total inerente (Hopkowitz, 2000).

Tabela 2.2 – Consumo específico de energia por grupos de tratamento (mecânico, biológico e manuseamento de lamas) e percentagem do consumo energético total em ETAR. Fonte: adaptado de Hopkowitz, 2000.

Grupos de tratamento	Consumo específico de eletricidade (kWh/m ³)	Percentagem do consumo total (%)
Tratamento mecânico	0,067	18
Tratamento biológico	0,274	72
Manuseamento de lamas	0,036	10
Total	0,377	100

2.2.5 Balanço energético da tecnologia de digestão anaeróbia em ETAR

É seguidamente apresentado um exemplo de balanço energético referente à tecnologia de digestão anaeróbia, retirado do estudo efetuado para a ETAR de Nowy Sącz na Polónia (Hopkowitz, 2000).

O consumo energético considerado é o aquecimento do reator, desprezando outros consumos relativos a bombas de alimentação e agitação do reator. Isto porque o aquecimento do reator é o principal consumo energético inerente à tecnologia de DA, como avaliado num estudo laboratorial efetuado na presente dissertação.

O consumo de energia (em água quente) para aquecimento do reator no processo de digestão anaeróbia calculado para a ETAR de Nowy Sącz foi de 1.427.878 kWh/ano. O consumo específico do aquecimento do reator fixou-se em 0,1278 kWh/m³ de AR. O total de energia química associada à produção de metano foi assim estimado em 2.760.285 kWh/ano. A produção específica de energia química foi de 0,2556 kWh/m³ de AR. A comparação entre os dois valores revela que metade (50%) da energia química inerente à produção de biogás é consumida no aquecimento do reator. Durante o Inverno quase toda a energia do biogás (após conversão para calor em caldeira) é usada no aquecimento do reator. Em condições médias, a energia química do biogás disponível após aquecimento do reator é de 0,1278 kWh/m³ (Hopkowitz, 2000).

Se o biogás for aplicado numa unidade de co-geração, a turbina a gás pode produzir calor (com eficiência de 55%) e eletricidade (com eficiência de 35%). Assim, a unidade de co-geração pode gerar potências de 176 kW na forma de energia térmica e 112 kW na forma de energia elétrica. Desta forma, a energia térmica produzida pode ser de 1.547.016 kWh/ano, representando uma produção específica de 0,1433 kWh/m³. Este valor é superior ao consumo específico necessário ao aquecimento do reator. Simultaneamente a unidade de co-geração produz 981.120 kWh/ano de energia elétrica, representando uma produção específica de 0,091 kWh/m³ (Hopkowicz, 2000).

A Tabela 2.3 apresenta sinteticamente os dados recolhidos para ilustrar de um modo simplificado o balanço energético associado ao processo de DA em regime de co-geração.

Tabela 2.3 – Balanço energético do processo de digestão anaeróbia com aplicação do biogás produzido em unidade de co-geração, na ETAR de Nowy Sacz. Fonte: adaptado de Hopkowicz, 2000.

Parâmetros	Consumo	Produção		
	Energia Térmica (Aquecim. reator)	Energia química (Biogás)	Energia Térmica (Co-geração)	Energia elétrica (Co-geração)
Total anual (kWh/ano)	1.427.878	2.760.285	1.547.016	981.120
Consumo específico (kWh/m³)	0,1278	0,2556	0,1433	0,091

2.3 Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo bioquímico que envolve o desenvolvimento de microrganismos bacterianos em ambiente anaeróbio, resultando na conversão biológica de resíduos orgânicos em biogás através de um conjunto sequencial de fases (Omolola, 2007).

O biogás é constituído por CH₄ (50 a 70%), CO₂ (30 a 45%) e outras substâncias, nomeadamente H₂S, O₂, N₂, H₂ (entre outros compostos residuais). O metano, ou biometano pela sua origem biológica, é o maior constituinte gasoso do biogás produzido e aquele que representa interesse pelo seu carácter combustível. O digerido resultante do processo de biodegradação anaeróbia apresenta um potencial de valorização agronómica, pela possibilidade de utilização como fertilizante em solos agrícolas (Omolola, 2007; Alves, 2013; Carvalho, 2010).

2.3.1 Etapas do processo

O processo de digestão anaeróbia é caracterizado por quatro fases principais – hidrólise, acidogénese, acetogénese e metanogénese. Vários microrganismos, incluindo bactérias fermentativas, acetogénicas e metanogénicas, estão envolvidos na degradação da matéria orgânica, originando subprodutos gasosos, maioritariamente CO_2 e CH_4 . Um sistema equilibrado é essencial para a estabilidade do processo (Mulat, 2015). A Figura 2.5 apresenta esquematicamente as etapas e os produtos envolvidos no processo de digestão anaeróbia.

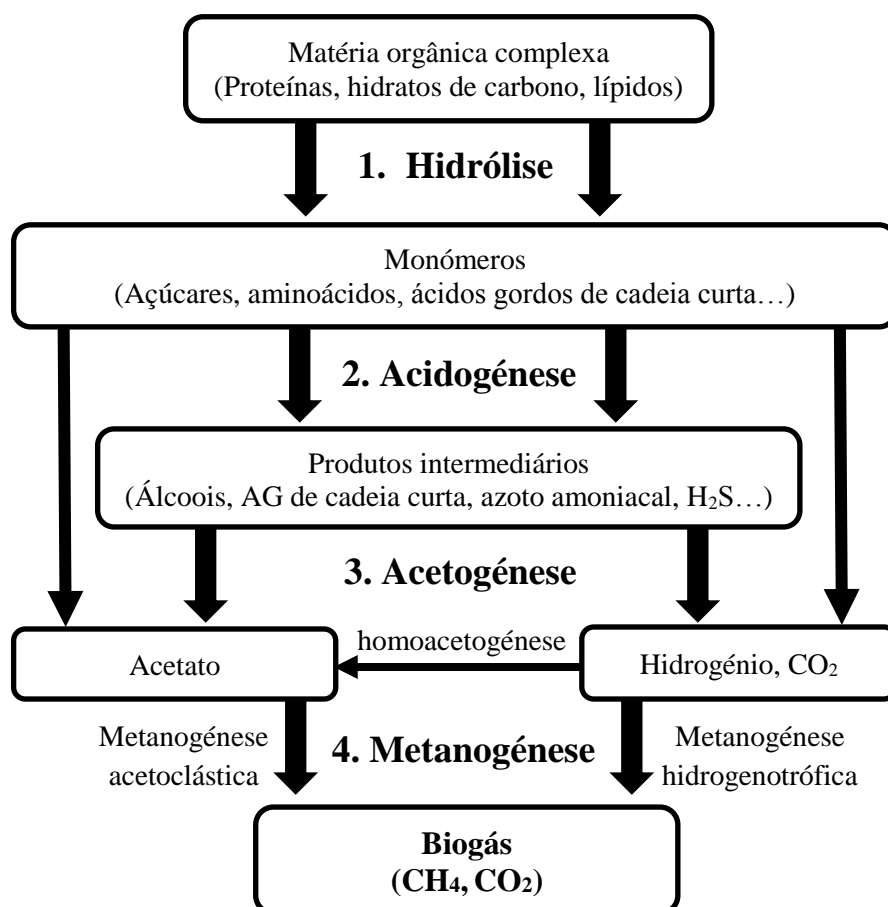


Figura 2.5 – Esquema de etapas do processo de digestão anaeróbia. Fonte: adaptado de Mulat, 2015.

Hidrólise

Nesta primeira etapa os polímeros, compostos de elevado peso molecular (proteínas, lípidos, hidratos de carbono e ácidos nucleicos), são degradados em monómeros, substâncias orgânicas solúveis e de menor peso molecular (aminoácidos, açúcares simples e ácidos gordos de cadeia longa). A degradação é efetuada pela libertação de enzimas extracelulares (celulases, amílases, proteases, lípases) (Leonardo, 2012).

Os microrganismos responsáveis pela hidrólise podem ser estritamente anaeróbios, do género *Bactericides* e *Clostridia* ou anaeróbios facultativos do género *Streptococci* (Carvalho, 2010).

A hidrólise tem um papel preponderante na quantidade final de biogás produzido e velocidade da reação global. A cinética da reação de hidrólise é afetada por um grande número de fatores, como é o caso da disponibilidade e da superfície específica do substrato. Se o substrato de alimentação do reator for rico em polímeros, a hidrólise é a etapa mais lenta e controla todo o processo de degradação enquanto se for facilmente hidrolisado, a fase mais lenta é a metanogénese (Carvalho, 2010; Leonardo, 2012).

Acidogénese

Os monómeros formados na hidrólise penetram nas células das bactérias anaeróbias, onde são transformados, entre outros produtos, em ácidos orgânicos (butírico, propiónico e acético), álcoois, aldeídos, ião amónio, hidrogénio e dióxido de carbono.

As bactérias acidogénicas representam cerca de 90% da população bacteriana no interior dos reatores dada a sua rápida duplicação e resistência às oscilações de pH (Carvalho, 2010; Leonardo, 2012).

Acetogénese

Sucedem-se a conversão dos produtos resultantes da acidogénese em acetato, dióxido de carbono e hidrogénio por bactérias sintróficas (produtoras obrigatórias de hidrogénio). Ocorre simultaneamente a homoacetogénese, com a transformação de uma parte do dióxido de carbono e hidrogénio produzidos em acetato (Leonardo, 2012).

Metanogénese

Consiste na transformação dos compostos anteriormente produzidos (principalmente acetato, H_2 e CO_2) em CH_4 (60-70%), CO_2 (30-40%) e outros gases vestigiais por ação de bactérias metanogénicas. A conversão de acetato através da reação de metanogénese acetoclástica produz aproximadamente 70% do CH_4 (Leonardo, 2012; Carvalho, 2010).

2.3.2 Parâmetros operacionais que influenciam a digestão anaeróbia

Determinados parâmetros operacionais da digestão anaeróbia deverão ser controlados por influenciarem diretamente o desempenho global do processo. São principalmente temperatura, pH, taxa de carga orgânica, tempo de retenção hidráulico, razão C/N, azoto amoniacal e ácidos gordos voláteis.

Temperatura

Segundo Dias (2014) o processo de digestão pode ocorrer em três regimes de temperatura: psicrófila ($5^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}$), mesófila ($32^{\circ}\text{C} - 37^{\circ}\text{C}$) e termófila ($49^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}$). É o parâmetro mais importante pela sua influência na atividade microbiana, cinética da hidrólise, solubilidade de diferentes compostos químicos presentes no reator, reações de equilíbrio e estrutura geral da comunidade microbiológica. A velocidade de várias reações químicas aumenta com a temperatura (Mulat, 2015; Carapinha, 2012; Metcalf and Eddy, 2003).

O funcionamento em regime mesofílico é o mais praticado pois apresenta a melhor relação entre a velocidade da reação e o gasto energético associado ao aquecimento do reator anaeróbio. Também apresenta menor sensibilidade a variações ambientais e efeito de fatores inibitórios ao processo, tais como a presença de amónia, relativamente à gama termófila de temperaturas (Mulat, 2015).

pH

O pH apresenta grande influência na atividade microbiológica. A gama de concentrações ajustada para a maioria dos microrganismos é de 6 – 9. As bactérias metanogénicas em sistemas de tratamento de águas residuais encontram-se mais ativas na zona de pH neutro (7). A biomassa inibida para valores de $\text{pH} \geq 9$ pode recuperar a sua atividade ajustando o pH para a neutralidade, a inibição por valores de $\text{pH} \leq 5$ não é recuperável.

Meios ácidos podem revelar-se bastante tóxicos para as bactérias metanogénicas. Por isso, é importante que o pH não desça para valores inferiores a 6,2 por um período de tempo significativo (Abdelgadir, et al. 2014; Dioha, et al. 2013).

A gama de pH ótimo no processo de DA é de 7 – 7,2, mas o processo funciona igualmente bem numa gama entre 6,6 e 7,6 (Awad Abdelgadir et Al, 2014; Dioha et Al, 2013).

Taxa de Carga orgânica

A taxa de carga orgânica (OLR – *organic loading rate*) representa a quantidade de matéria orgânica de alimentação do reator, por unidade de volume, por dia. A OLR deverá ser ajustada até originar a produção máxima diária de biogás, variando consoante a dimensão do reator (Abdelgadir, et al. 2014).

Tempo de retenção hidráulico

O tempo de retenção hidráulico (TRH) é calculado pela razão entre o volume útil do digestor e o caudal de alimentação do mesmo e deve ser ajustado de modo a conferir o tempo necessário ao processo para que a matéria orgânica seja devidamente degradada e consequentemente transformada em biogás. Assim, a biodegradabilidade do substrato é determinante para a escolha do TRH de acordo com os parâmetros operacionais previamente definidos para o processo (Abdelgadir, et al. 2014).

Dioha, et al. (2013) cita os estudos de Yeole and Ranade (1992) e Gadre, et al. (1990), que reportam TRH ótimos de 14 dias e de 15 dias, respetivamente, para produção de biogás com resíduos de vacaria. Atualmente, a maioria dos reatores anaeróbios em ETAR operam com um TRH entre 15 e 30 dias, em regime de temperatura mesófila (Alepo, et al. 2016).

Razão C/N

A taxa de produção de biogás depende da razão C/N. A taxa de produção de biogás ótima foi registada no rácio de 20 – 30:1. A variação dos valores da razão C/N podem afetar o pH do meio. O aumento de carbono no meio traduz-se em maior formação de CO₂, reduzindo o valor de pH, enquanto um valor mais elevado de azoto irá aumentar a produção de azoto amoniacal, que poderá aumentar o valor de pH do meio. Ambas as situações podem significar a inibição da atividade microbiológica no processo de DA (Dioha, et al. 2013).

Azoto amoniacal

O azoto amoniacal é representado pela presença de amoníaco (NH₃) e ião amónio (NH₄⁺) no meio. É libertado principalmente durante a degradação de proteínas. O amoníaco é o principal responsável pela inibição da atividade microbiana, principalmente de bactérias metanogénicas (Mulat, 2015).

É geralmente aceite que concentrações de azoto amoniacal inferiores a 200 mg/L são benéficas para o processo de digestão anaeróbia, visto que o azoto é um nutriente essencial para os microrganismos anaeróbios. A literatura reporta uma vasta gama de concentrações de azoto amoniacal inibitórias para os microrganismos, com valores entre 1,7 e 14 g/L a causarem uma redução de 50% na produção de metano. A diferença significativa entre valores inibitórios pode ser atribuída à diferença entre substratos, condições do meio (ex. temperatura e pH) e períodos de adaptação das culturas microbianas (Chen, et al. 2007).

Ácidos gordos voláteis (cadeia curta)

Ácidos gordos voláteis (AGV) têm origem durante a fase de hidrólise. Os ácidos gordos de cadeia curta são parte integrante dessa categoria de compostos, revelando-se importantes para a produção final de biogás. No entanto, concentrações elevadas tornam-se inibidores da metanogénese, devido a alterações provocadas no pH. Os ácidos propiónico e butírico são os AGV que mais afetam a metanogénese. A sua inibição ocorre quando a acumulação de AGV dá origem a concentrações superiores a 4 g/L (Dias, 2014).

2.3.3 Reatores Anaeróbios

O reator anaeróbio convencionalmente utilizado em ETAR (inclusivamente o verificado no estudo desenvolvido na dissertação) é o reator agitado contínuo de mistura completa CSTR (*continuous stirred-tank reactor model*).

Ainda assim considera-se conveniente abordar outros tipos de reatores otimizados, pois à medida que a tecnologia de digestão anaeróbia foi avançando tornou-se evidente que a eficiência do processo de digestão poderia ser melhorada com a implementação de mais eficientes métodos de retenção da biomassa de alimentação do reator (Mara e Horan, 2003).

São apresentados na Figura 2.7 diferentes tipos de reatores anaeróbios. A Tabela 2.4 indica os parâmetros operacionais associados a cada tipo de reator apresentado na Figura 2.6.

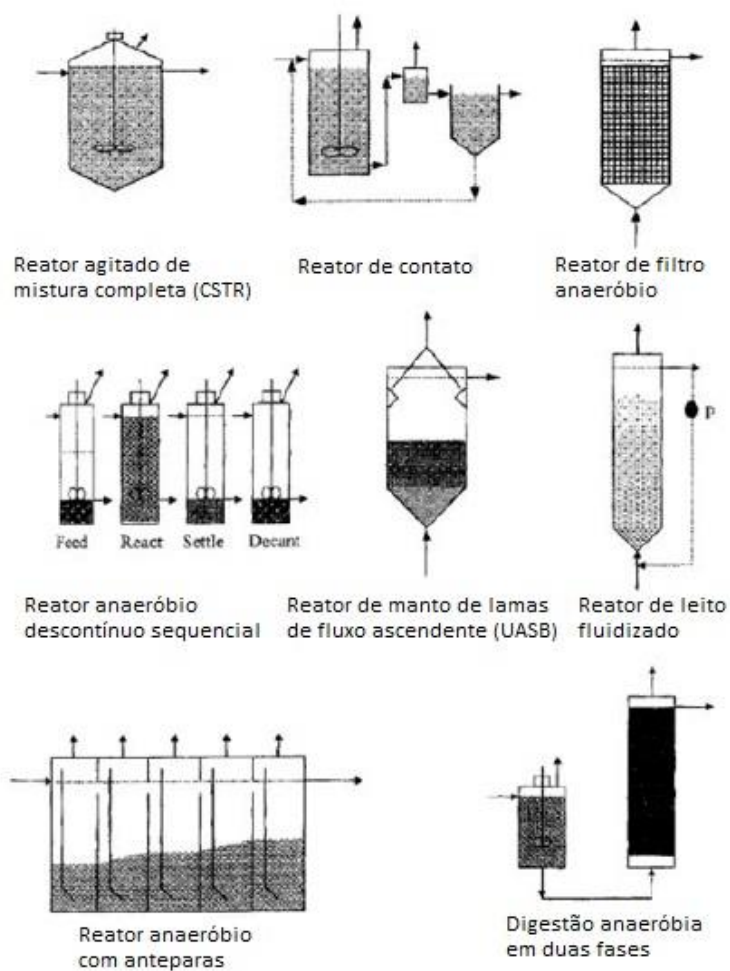


Figura 2.6 – Tipos de reatores anaeróbios (adaptado de Mara e Horan, 2003).

Tabela 2.4 – Parâmetros operacionais associadas a cada tipo de reator anaeróbio. Fonte: Adaptado de Mara e Horan, 2003.

Tipo de reator	Alimentação (kg CQO/m ³ .dia)	TRH (h)	Remoção CQO (%)
Reator agitado de mistura completa	1-5	240-360	60-80
Reator anaeróbio de contacto	1-6	24-120	70-95
Reator anaeróbio descontínuo sequencial	1-10	6-24	75-90
Reator de filtro anaeróbio	2-15	10-85	80-95
Reator de leito fluidizado	2-50	1-4	80-90
Reator UASB	2-30	2-72	80-95
Reator com anteparas	3-35	9-32	75-95
Digestão anaeróbia em 2 fases	5-30	20-150	70-85

Reator agitado de mistura completa

É um reator com agitação interna que permite a homogeneização do substrato no interior do reator. A alimentação é contínua ou semi-contínua (varias alimentações diárias). É o reator mais utilizado em ETAR e inclusivamente o que se encontra instalado na ETAR alvo de estudo na dissertação.

Por não apresentar qualquer método de retenção de sólidos, o TRS é igual ao TRH, pelo que o seu *modus operandi* baseia-se na entrada de caudal de alimentação (afluente) ao mesmo tempo que acontece a saída de caudal (efluente), de modo a manter as condições operacionais ideais no interior do reator, sem ocorrência de grandes perturbações, e permitir o crescimento contínuo de biomassa.

Como tal, a sua operação está dependente do crescimento contínuo de nova biomassa bacteriana de modo a substituir a que se perde pelo efluente. O TRH nunca deve ser inferior a 10 dias, de modo a assegurar um tratamento eficaz e um quantitativo populacional de microrganismos adequado no interior do reator. Pela elevada quantidade de substrato e TRH necessários ao seu funcionamento, este tipo de reator encaixa bem em contexto de ETAR, cujo substrato gerado é geralmente rico em sólidos voláteis e, se necessário, procede-se ao espessamento de lamas para aumentar tal concentração. (Mara e Horan, 2003).

2.3.4 Pré-tratamento de Substratos.

Os pré-tratamentos dos substratos de alimentação para otimizar o processo de DA têm sido alvo de sucessivos estudos de modo a avaliar as vantagens associadas a tal prática, nomeadamente no potencial aumento de produção de biogás.

A realização de um pré-tratamento vai afetar diretamente a fase de hidrólise. A sua aplicação passa normalmente por hidrolisar o substrato antes da alimentação do reator anaeróbio, facilitando o processo e resultando numa maior velocidade da hidrólise e maior produção final de biogás. No caso de matérias-primas de origem vegetal, o pré-tratamento revela-se essencial pela necessidade de quebrar as fibras na sua composição, facilitando consideravelmente o processo de biodegradação microbológica (Carvalho, 2010). Os pré-tratamentos podem ser biológicos, físicos, químicos.

Complexos Enzimáticos (pré-tratamento biológico):

São utilizados complexos enzimáticos na intenção de potenciar a hidrólise do substrato de alimentação, principalmente em resíduos que dificultam o processo de digestão anaeróbia, como os de origem vegetal, facilitando a libertação dos hidratos de carbono constituintes dos polissacarídeos da celulose, hemicelulose e lenhina, principais componentes estruturais dos substratos vegetais. Estes complexos enzimáticos podem ser obtidos a partir de fungos, visto que são os únicos organismos capazes de digerir a lenhina, o constituinte mais difícil de hidrolisar nas plantas (Carvalho, 2010).

Em termos económicos a adição de enzimas vai provocar um aumento nos custos de produção, mas um estudo realizado na Alemanha, em centrais agrícolas, provou que a utilização de complexos enzimáticos era uma opção economicamente viável (Carvalho, 2010).

Fragmentação mecânica (pré-tratamento físico):

A fragmentação mecânica do substrato é um dos pré-tratamentos mais comuns e também o utilizado na componente laboratorial desenvolvida na presente dissertação.

O pré-tratamento mecânico passa por triturar o co-substrato na intenção de desintegrar o material constituinte, melhorando a fase da hidrólise do processo de digestão anaeróbia ao facilitar a sua solubilização. Exemplos de fragmentação mecânica são o uso de corte, jato mecânico, moinho de corte ou moinho de bolas e homogeneização a pressão elevada. São aplicados principalmente a resíduos com partículas de grandes dimensões e resíduos agrícolas que poderão ter um papel de co-substrato de alimentação a juntar ao substrato principal formado pelas lamas de ETAR (Carvalho, 2010).

Este método é frequentemente abordado na literatura como um método de recomendável utilização pelo baixo custo operacional e eficaz degradação da matéria orgânica (Alves, 2015).

Hidrólise térmica (pré-tratamento térmico)

Esta tecnologia é usada para melhorar a biodegradabilidade dos substratos. Desta forma, foi desenvolvido o conceito de aplicação desta tecnologia no melhoramento da biodegradabilidade das lamas de ETAR. Realiza-se numa gama de temperatura ótima entre 160 e 180°C, para um período de 20 a 40 minutos, e pressão entre os 600 e 2500 kPa (Barber, 2016; Alves 2015).

As vantagens desta tecnologia, entre outras, são (Barber, 2016):

- Aumento da biodegradabilidade das lamas primárias de ETAR.
- Permite significativamente maiores taxas de carga resultando em menores reatores de digestão.
- Maior remoção de sólidos voláteis (55 a 62% adicional).
- Aumenta a taxa de produção de biogás (25-30% de produção adicional).
- Melhora a desidratabilidade e higienização das lamas.
- Esteriliza as lamas fornecendo bio-sólidos livres de agentes patogénicos.
- Reduz o odor e o ressurgimento de agentes patogénicos resultante dos processos de desidratação.
- Elevado grau de estabilização da fração de alimentação digerida.
- Teor de matéria seca em lamas de ETAR entre 33-38%.

As desvantagens mais significativas são (Barber, 2016):

- Elevado consumo energético.
- Maiores concentrações de azoto amoniacal comparando com DA tradicional.
- Requer caldeiras.
- A lama precisa de arrefecimento antes da digestão anaeróbia.
- Necessita de espessamento prévio por centrifugação até 16-18% de matéria seca.
- Maior libertação de nutrientes com potencial de cristalização e subsequentes problemas de manutenção.

Hidrólise ácida/alcalina (pré-tratamento químico)

Consiste na preparação de uma solução (ácido ou alcalina) que será adicionada ao substrato de alimentação durante um determinado período de tempo e, em condições de temperatura e de pressão previamente definidas. Ensaio prévios devem ser realizados para determinar o pH apropriado ao tipo de substrato. Os reagentes mais utilizados neste pré-tratamento são hidróxido de sódio (NaOH), óxido de cálcio ou cal (CaO), cal hidratada (Ca(OH)₂) e ácido sulfúrico (H₂SO₄) e ácido clorídrico (HCl) (Alves, 2015).

Os pré-tratamentos químicos são efetuados com o objetivo de destruir as paredes e membranas celulares das células constituintes dos resíduos orgânicos, aumentando a solubilização da matéria orgânica e tornando-a mais facilmente biodegradável (Crespo, 2013).

2.3.5 Co-digestão

A co-digestão anaeróbia é uma técnica que contempla a adição de um ou mais co-substratos ao substrato de alimentação base, com o objetivo de aumentar o rendimento da digestão anaeróbia.

A co-digestão anaeróbia é uma opção para superar as desvantagens de digerir isoladamente, por exemplo, lamas de ETAR e melhora a viabilidade económica de unidades de digestão anaeróbia por aumentar a produção de biogás. Dados operacionais indicam muitas vezes a existência de capacidade volúmica não usada nos reatores de digestão anaeróbia em ETAR, algumas vezes de até 30%. Assim, seria rentável usar esta capacidade extra introduzindo co-substratos adicionais, conduzindo à prática de co-digestão em unidades de DA existentes (Fonoll, et al. 2015).

A adição de co-substratos pode inclusivamente corrigir valores de parâmetros operacionais associados ao substrato base, cuja análise química efetuada revele que inicialmente não estariam dentro dos níveis recomendados para o processo de digestão anaeróbia, tais como a razão C:N (carbono: azoto), a necessidade de melhorar a qualidade do digerido e a minimização de efeitos inibidores ou tóxicos que ocorreriam na degradação de um único substrato (Alves, 2015).

Neste sentido, é importante escolher os melhores co-substratos e aferir a percentagem da mistura de alimentação do reator no sentido de promover interações positivas, diluir compostos tóxicos e/ou inibitórios, otimizar a produção de metano e preservar a estabilidade do processo de digestão. Podem ser utilizados co-substratos de diferentes origens, tais como resíduos de atividade de ETAR (remoção de gorduras), culturas agrícolas, agropecuária, óleos e gorduras animais, fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos e efluentes resultantes de atividade industrial que origine resíduos de composição orgânica (Fonoll, et al. 2015; Alves, 2015).

Segundo um estudo publicado por Fonoll, et al (2015), a co-digestão entre lamas de ETAR e resíduos de fruta permitiu o aumento da taxa de carga orgânica (OLR) de 1,2 para 3,0 g SVT/L.dia e da produção de metano ($L_{CH_4} \cdot L_{reator}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$) entre 110% e 180%, dependendo da biodegradabilidade dos co-substratos.

Devido a quantidades elevadas de matéria orgânica facilmente biodegradável, resíduos de fruta são considerados muito apropriados para se adicionarem a lamas de ETAR, que se caracterizam por uma relativamente baixa razão C:N e alta capacidade para receber de forma estável a adição pretendida (Fonoll, et al, 2015).

2.4 Tecnologia solar fotovoltaica

O presente subcapítulo irá abordar literatura relacionada com a tecnologia solar fotovoltaica, começando pela composição típica da célula fotovoltaica, o seu modelo matemático e curvas de funcionamento. Serão abordadas as duas principais tecnologias de fabrico de células fotovoltaicas: células monocristalinas e policristalinas. Efetua-se uma revisão da legislação nacional relativa a pequena produção e autoconsumo. O desfecho do subcapítulo apresenta uma pesquisa de mercado relativa aos custos de implementação de sistemas solares fotovoltaicos.

2.4.1 Composição da célula fotovoltaica

A célula fotovoltaica é constituída por um material semicondutor (silício), ao qual são adicionados elementos dopantes que desenvolvem condições para a ocorrência do efeito fotovoltaico, convertendo a radiação solar em energia elétrica de corrente contínua. A adição de substâncias dopantes pretende alterar as propriedades elétricas do semicondutor, na intenção de criar duas camadas distintas – camadas *tipo n* e *tipo p*. Esta prática visa criar um campo elétrico entre as duas camadas, possibilitando a produção de corrente elétrica (Castro, 2011).

A camada *tipo n* é geralmente formada adicionando fósforo ao silício puro. Cada átomo forma quatro ligações covalentes com átomos de silício, possuindo cinco eletrões na banda de valência. O eletrão adicional de cada átomo de fósforo introduzido pode mover-se livremente dentro do cristal, transportando carga elétrica. A adição de boro forma a camada *tipo p*. Neste caso, cada átomo forma quatro ligações covalentes com átomos de silício, possuindo apenas três eletrões na banda de valência, resultando num buraco por cada átomo de boro introduzido. Os eletrões de átomos vizinhos de silício podem preencher os buracos resultantes da adição de boro, provocando a formação de novos buracos, criando-se uma deslocalização dentro do cristal. A união das duas camadas forma uma zona de transição denominada de *junção p-n*. Esta junção proporciona a criação de um campo elétrico que separa os portadores de carga (GREENPRO, 2004).

Quando uma célula solar é exposta à luz os fotões são absorvidos pelos eletrões até ocorrer quebra das ligações covalentes, provocando o deslocamento dos eletrões entre camadas por efeito da diferença de potencial criada. Os eletrões direcionam-se para os condutores metálicos que, ligados a uma carga, farão circular corrente elétrica. Se a célula não estiver ligada a nenhuma carga, é obtida a tensão em circuito aberto da célula (Coutada, 2015).

A Figura 2.7 ilustra a constituição de uma célula fotovoltaica típica.

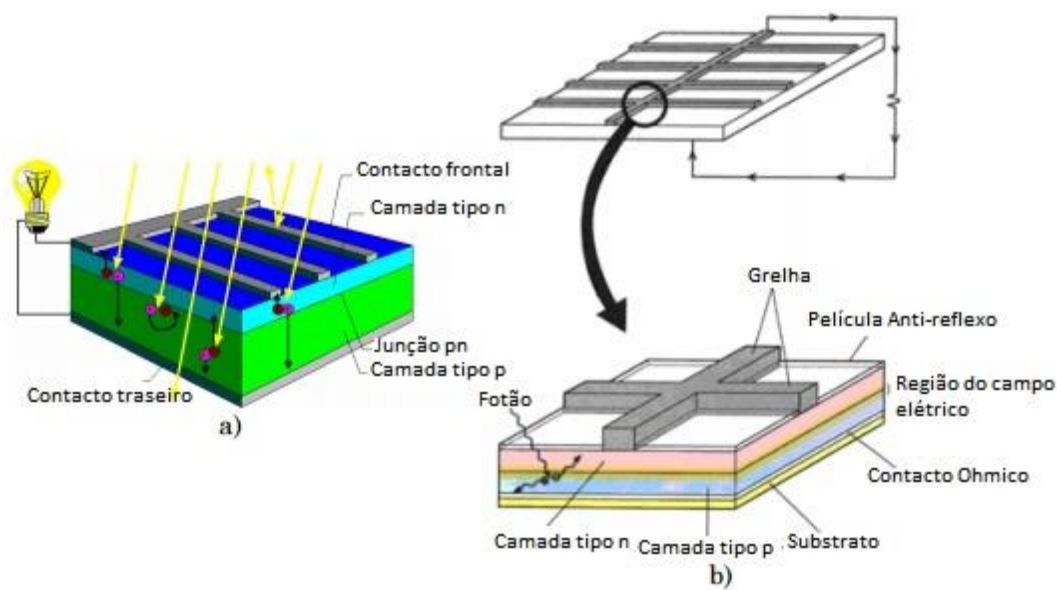


Figura 2.7 – a) constituição interna de uma célula fotovoltaica típica; b) Constituição pormenorizada da grelha metálica. Fonte: Castro 2011.

2.4.2 Modelo eléctrico da célula fotovoltaica

O comportamento de uma célula fotovoltaica quando recebe radiação solar pode ser descrito através de um circuito eléctrico equivalente simplificado (Figura 2.8).

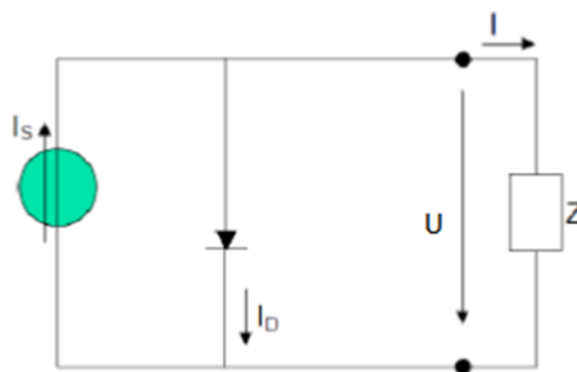


Figura 2.8 - Circuito eléctrico equivalente de uma célula fotovoltaica que alimenta uma carga. Fonte: Coutada, 2015.

A fonte que gera a corrente (I_s) pretende representar a corrente eléctrica gerada pelo feixe de fótons (efeito fotovoltaico).

A *junção p-n* pode ser representada por um díodo cujo princípio de funcionamento permite a passagem de uma corrente interna unidireccional (I_D), que depende da tensão (U) aos terminais da célula (Coutada 2015; Castro, 2011; Freitas, 2008).

A corrente I_D que atravessa o díodo é calculada através da Equação 1.

$$I_D = I_0 \times (e^{\frac{U}{mU_T}} - 1) \quad (1)$$

- I_0 – Corrente inversa máxima de saturação do díodo;
- U – Tensão aos terminais da célula;
- m – Fator de idealidade do díodo (díodo ideal: $m = 1$; díodo real: $m > 1$);
- U_T – Potencial térmico $U_T = \frac{kT}{q}$
- T – Temperatura absoluta da célula em K;
- q – Carga elétrica do eletrão ($q = 1,6 \times 10^{-9}$ C);
- k – Constante de Boltzman.

A corrente I que alimenta a carga Z é calculada pela Equação 2.

$$I = I_s - I_D = I_s - I_0 \times (e^{\frac{U}{mU_T}} - 1) \quad (2)$$

Recorrendo às Equações 1 e 2, é possível obter a expressão de cálculo da corrente inversa de saturação (I_0):

$$I_0 = \frac{I_{cc}}{e^{\left(\frac{U_{ca}}{mU_T}\right)} - 1} \quad (3)$$

I_{cc} – Corrente de curto circuito.

U_{ca} – Tensão em circuito aberto.

Corrente de curto-circuito e tensão em circuito aberto

Dois dos parâmetros operacionais caraterísticos das células de um painel fotovoltaico, fornecidos pelo fabricante em condições de referência, são a corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto (Castro, 2011; Freitas, 2008).

A corrente de curto-circuito é o máximo valor de corrente, obtido quando a tensão se iguala a 0 e correspondente à corrente gerada por efeito fotovoltaico (Freitas, 2008). Entende as premissas representadas pelas Equações 4 e 5.

$$U = 0; I_D = 0 \quad (4)$$

$$I = I_s = I_{cc} \quad (5)$$

A tensão em circuito aberto é o valor máximo da tensão aos terminais da célula, que ocorre quando o circuito está em vazio. É dada pelas Equações 6 e 7.

$$I = 0 \quad (6)$$

$$U_{ca} = m \times U_t \times \ln \left(1 + \frac{I_{cc}}{I_0} \right) \quad (7)$$

Condições de referência para células fotovoltaicas (STC)

As condições de referência para células fotovoltaicas (STC) sobre as quais são medidos os parâmetros característicos da célula são (Freitas, 2008):

- Irradiância: $H_r = 1000 \text{ W/m}^2$
- Temperatura: $\theta^r = 25^\circ\text{C} \Leftrightarrow T^r = 298,16 \text{ K}$

Potência elétrica

A potência elétrica de saída (P) de um módulo fotovoltaico é o produto entre a tensão e a corrente de saída, calculado pela Equação 8 (Coutada 2015; Castro, 2011):

$$P = U \times I = U \left[I_{cc} - \left(I_0 \left(\frac{U}{e^{mU_T}} - 1 \right) \right) \right] \quad (8)$$

A Figura 2.9 exemplifica a curva I-U de uma célula fotovoltaica.

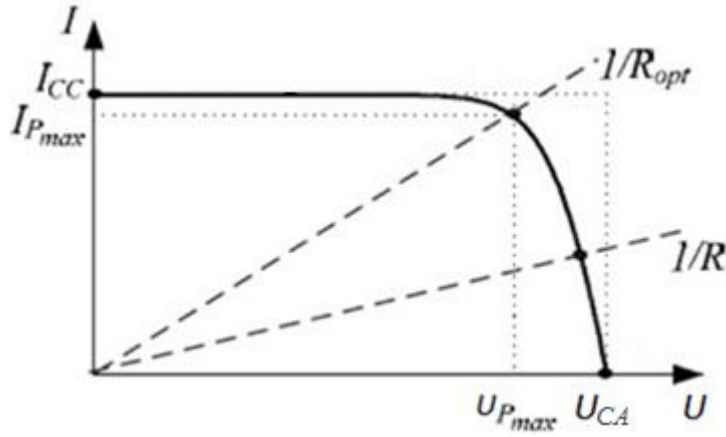


Figura 2.9 – Curva I-U genérica de uma célula fotovoltaica. Fonte: adaptado de Ferreira, 2008.

O ponto de potência máxima é calculado pela Equação 9:

$$P_{max} = U_{Pmax} \times I_{Pmax} \quad (9)$$

P_{max} – Ponto de potência máxima (W).

U_{Pmax} – Tensão no ponto de máxima potência (V).

I_{Pmax} – Corrente no ponto de máxima potência (A).

Rendimento da célula fotovoltaica

O rendimento da célula (Equação 10) define-se pela relação entre o ponto de potência máxima de uma célula e a potência da radiação solar incidente sobre a célula (Coutada, 2015).

$$\eta = \frac{P_{max}}{A \times G} \quad (10)$$

A – Área da célula;

G – Irradiância por unidade de superfície.

2.4.3 Tecnologias das células fotovoltaicas

A classificação das células depende do material usado no seu fabrico. As células PV que dominam o mercado na atualidade, representando cerca de 90% da procura, são as monocristalinas e as policristalinas, que serão abordadas em maior detalhe (Fraunhofer ISE & PSE AG, 2016).

Células monocristalinas

As células de silício monocristalino apresentam uma estrutura cristalina contínua, praticamente sem impurezas. A utilização de um único cristal de silício confere uniformidade à estrutura molecular da célula, potenciando o efeito fotovoltaico pretendido. Apresentam como principal vantagem a alta eficiência de conversão. A eficiência máxima registada em laboratório foi de 25,6% para células e de 23% para módulos. A principal desvantagem desta tecnologia é o seu elevado custo de produção comparativamente com as restantes soluções (Coutada, 2015; Fraunhofer ISE & PSE AG, 2016). A Figura 2.10 exemplifica uma célula monocristalina.

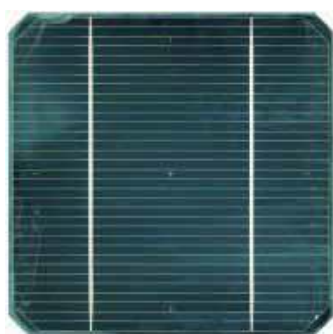


Figura 2.10 – Exemplo de célula monocristalina. Fonte: GREENPRO, 2004.

Células policristalinas

São produzidas usando numerosos grãos de silício monocristalino. As descontinuidades da estrutura molecular inerentes à sua composição heterogênea dificultam o movimento de eletrões proporcionando a recombinação com as lacunas (cargas positivas), reduzindo a potência de saída. No processo de fabrico, o silício policristalino fundido é moldado em lingotes, que são subsequentemente cortados em placas muito finas e montadas em células completas. Estas células apresentam um custo de produção inferior ao das células monocristalinas mas a sua eficiência de conversão é igualmente inferior. A máxima eficiência reportada em laboratório para esta tecnologia é de 21,3% para as células e de 19,2% para os módulos (Coutada, 2015; Fraunhofer ISE & PSE AG, 2016). A Figura 2.11 apresenta um exemplo de célula de silício policristalino.



Figura 2.11 – Célula policristalina com antirreflexo e filamentos elétricos. Fonte: GREENPRO, 2004

2.4.4 Legislação nacional relativa a pequena produção e autoconsumo.

O decreto-lei n.º 153/2014, de 20 de outubro, veio terminar o regime bonificado, implementando uma nova legislação para a produção descentralizada, dividida em dois regimes distintos, o Autoconsumo (UPAC) e a pequena produção (UPP).

A produção descentralizada através de unidades de miniprodução e de microprodução têm demonstrado que a evolução tecnológica permite hoje em dia desenvolver projetos com recurso a menor investimento, o que justificou a adequação da respetiva remuneração da energia proveniente destas unidades de produção.

O Governo reconhece o potencial da atividade de produção em autoconsumo e revela a intenção de promover um maior conhecimento por parte do consumidor do respetivo perfil de consumo, induzindo comportamentos de eficiência energética e contribuindo para a otimização dos recursos endógenos.

O regime de pequena produção entende a totalidade da venda da energia elétrica produzida pelo sistema fotovoltaico à RESP, para potências instaladas não superiores a 250 kW, com tarifa atribuída obtida através de um modelo de licitação. O regime de autoconsumo entende a produção de energia elétrica para consumo próprio, apesar da possibilidade de venda do excedente à rede, a 90% do preço de mercado estabelecido pela OMIE. Assim, o produtor beneficia quando a unidade de produção é dimensionada de acordo com as suas necessidades de consumo.

As portarias n.º 14/2015 e n.º 15/2015, de 23 de janeiro, definem o procedimento para apresentação de mera comunicação prévia de exploração das unidades de produção para autoconsumo, bem como para obtenção de um título de controlo prévio no âmbito da produção para autoconsumo ou da pequena produção para injeção total na rede elétrica de serviço público da energia elétrica

produzida. Vem igualmente determinar o montante das taxas previstas no Decreto-Lei n.º 153/2014, de 20 de outubro.

Remuneração da energia proveniente das UPAC

O valor da energia elétrica fornecida à RESP pelo produtor abrangido pelo disposto no decreto-lei n.º 153/2014, de 20 de outubro é calculado de acordo com a Equação 11.

$$R_{UPAC,m} = E_{fornecida,m} \times OMIE_m \times 0,9 \quad (11)$$

$R_{UPAC,m}$ – A remuneração da eletricidade fornecida à RESP no mês ‘ m ’, em €;

$E_{fornecida,m}$ – A energia fornecida no mês ‘ m ’, em kWh;

$OMIE_m$ – O valor resultante da média aritmética simples dos preços de fecho do operador do mercado ibérico de energia (OMIE) para Portugal, relativos ao mês ‘ m ’, em €/kWh;

m – O mês a que se refere a contagem da eletricidade fornecida à RESP.

Compensação devida pelas UPAC

As UPAC com potência instalada superior a 1,5 kW e cuja instalação está ligada à RESP estão sujeitas ao pagamento de uma compensação mensal fixa, nos primeiros 10 anos após obtenção do certificado de exploração e é calculada de acordo com a Equação 12.

$$C_{UPAC;m} = P_{UPAC} \times V_{CIEG;t} \times K_t \text{ €} \quad (12)$$

$C_{UPAC;m}$ – A compensação paga no mês m por cada kW de potência instalada, que permita recuperar uma parcela dos custos decorrentes de medidas de política energética, de sustentabilidade ou de interesse económico geral (CIEG) na tarifa de uso global do sistema, relativa ao regime de produção de energia elétrica em autoconsumo;

P_{UPAC} – Valor da potência instalada da UPAC;

$V_{CIEG;t}$ – Valor que permite recuperar os CIEG da respetiva UPAC (em €/kW), apurado no ano t .

K_t – Coeficiente de ponderação, entre os 0% e 50%, a aplicar ao $V_{CIEG;t}$ tendo em consideração a representatividade da potência total registada das UPAC no SEN, no ano t .

2.4.5 Custos de implementação de sistemas solares fotovoltaicos

Devido ao progresso tecnológico, curva da experiência e economias de escala, o custo do investimento em sistemas PV decresceu em média 14%/ano, quase 75% no período de 2006 a 2014. Prevê-se que a média global do custo total de sistemas PV com escala de utilidade pública (montagem no solo) decresça aproximadamente 57% no período de 2015 a 2025 (Taylor, et al. 2016; Wirth, 2016).

Os preços reportados relativos a sistemas PV variam largamente e dependem de uma variedade de fatores incluindo a dimensão do sistema, localização, tipo de cliente, conexão à rede, especificações técnicas, entre outros. A Tabela 2.5 apresenta seletivamente os resultados de um estudo relativo ao custo de sistemas solares fotovoltaicos em quatro países da Europa em 2014. A gama de preços reportados na Tabela 2.5 é função do país e dos fatores específicos do projeto de instalação do sistema PV. No geral, o custo dos sistemas decresceu do ano 2013 para o ano 2014 (Internacional Energy Agency, 2015).

Tabela 2.5 – Custo de implementação de sistemas fotovoltaicos instalados em quatro países da Europa, em 2014. Fonte: IEA.

País	Residencial (€/W)	Comercial (€/W)	Industrial (€/W)	Montagem no solo (€/W)
França	3 – 4	2,1 – 2,4	NA	1,2 – 1,4
Alemanha	1,6	1,24	NA	1
Itália	1,45 – 1,89	NA	NA	0,92 – 1,14
Espanha	2,2	1,5	1,2	1,2

Um estudo elaborado pela *Fraunhofer - Institute for Solar Energy Systems* (ISE) considera um tempo de vida para o sistema fotovoltaico de 25 anos com substituição do inversor ao fim de 15 anos (Mayer, et al. 2015).

O gráfico ilustrado na Figura 2.12 apresenta uma média ponderada global dos custos totais de instalação de sistemas fotovoltaicos, com base nos valores do ano 2015. A análise do gráfico permite verificar o valor previsto para 2016 de aproximadamente 1450 €/kW (Taylor, et al. 2016).

Média ponderada global dos custos totais de instalação de sistemas fotovoltaicos

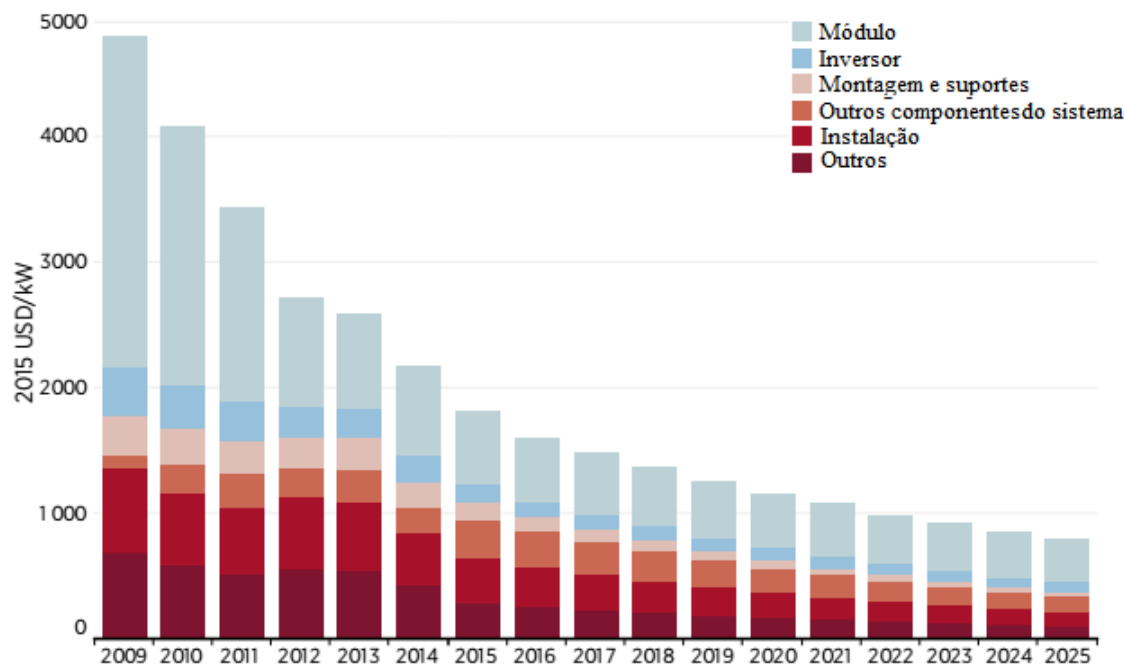


Figura 2.12 – Média ponderada global do total de custos de instalação de sistemas solares fotovoltaicos de montagem no solo (valores base de 2015). Fonte: IRENA analysis e Photon Consulting, 2016.

2.4.6 Centrais fotovoltaicas implementadas em ETA, em Portugal

A empresa Águas do Algarve do grupo Águas de Portugal dispõe de duas centrais fotovoltaicas implementadas nas Estações de Tratamento de Água (ETA) de Tavira e de Alcantarilha. As suas principais características apresentam-se seguidamente.

Central fotovoltaica da ETA de Tavira:

- Investimento: 552.717,20 EUR.
- Taxa de Participação de Financiamento: 65%.
- Potência instalada: 432 kW.
- Potência unitária do módulo: 245 W.
- Número de módulos: 1.760.
- Painéis por *string*: 22.
- Número de *strings*: 80.
- Área de implantação: 8.000 m².
- Entrou em produção no dia 09 de julho de 2015.
- Está totalmente instalada no interior do recinto da ETA de Tavira (8.600 m²).

Central fotovoltaica da ETA de Alcantarilha:

- Investimento: 594.186,34 EUR.
- Taxa de Comparticipação de Financiamento: 65%.
- Potência instalada: 432 kW.
- Potência unitária do módulo: 245 W.
- Número de módulos: 1.760.
- Painéis por *string*: 22.
- Número de *strings*: 80.
- Área de implantação: 8.000 m².
- Entrou em produção no dia 16 de julho de 2015.
- Uma parte está instalada no interior do recinto da ETA de Alcantarilha (3.600 m²) e o restante num terreno anexo à ETA (4.800 m²).

Relativamente aos custos de implementação dos sistemas PV suprarreferidos, verifica-se que variam entre 1280 €/kW (ETA de Tavira) e 1375 €/kW (ETA de Alcantarilha) para a mesma potência de pico instalada de 432 kW.

Entre o período de agosto a dezembro de 2015, relativamente ao período homólogo de 2014, os consumos de energia elétrica registaram uma redução de 330.334 kWh na ETA de Tavira e de 265.970 kWh, na ETA de Alcantarilha, resultando numa diminuição do consumo específico de 129 W e de 172 W por m³ de AR tratada, respetivamente. Os custos específicos diminuíram 0,009 e 0,014 €/m³ de AR tratada, respetivamente. Também as emissões de CO₂ emitidas para a atmosfera diminuíram em cerca de 155 TCO₂ na ETA de Tavira e 125 TCO₂ na ETA de Alcantarilha (Águas do Algarve, SA, 2015).

Capítulo 3 Material e Métodos

No presente capítulo serão descritos os materiais e a metodologia de elaboração do estudo proposto. O fluxograma ilustrado na Figura 3.1 apresenta a organização do trabalho desenvolvido.

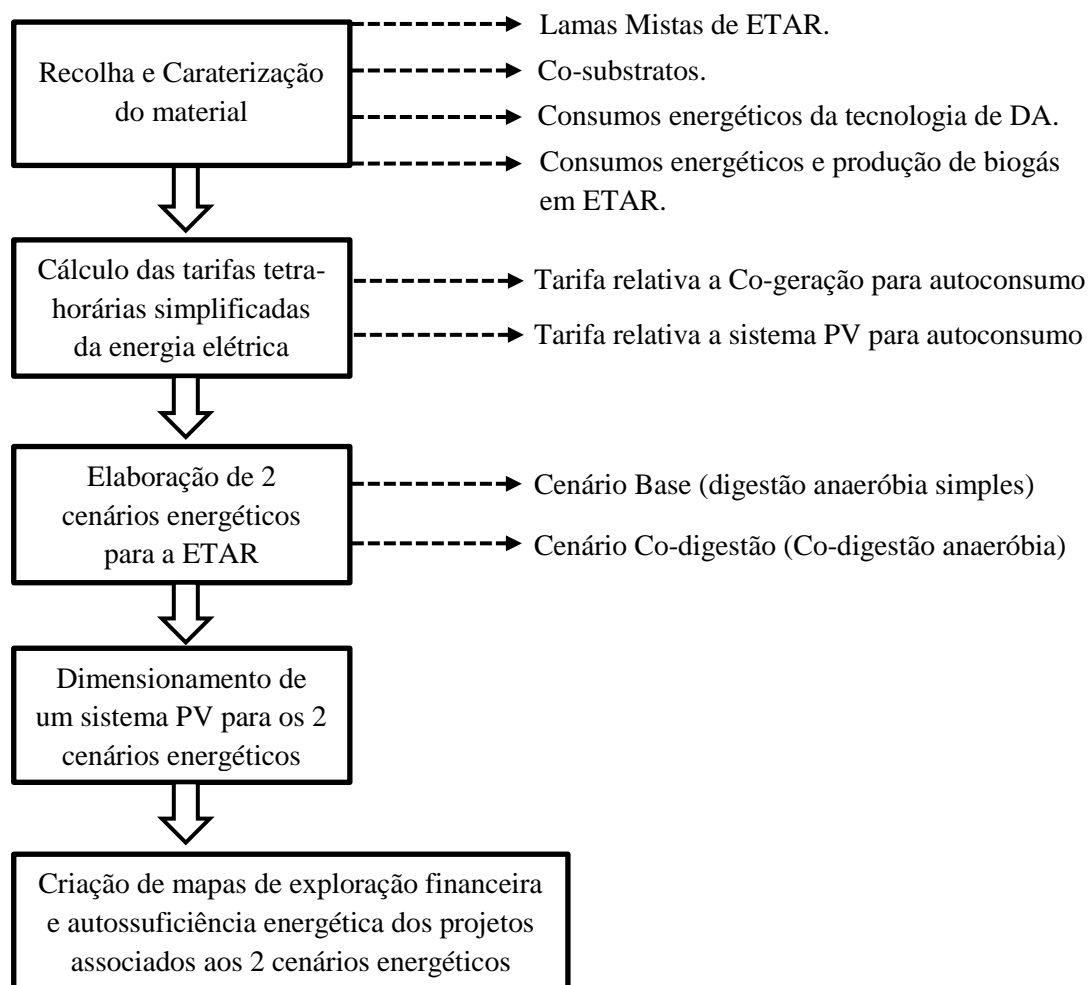


Figura 3.1 – Fluxograma ilustrativo da organização sequencial do material e métodos utilizados.

3.1 Recolha e caraterização do material

A recolha e caraterização do material necessário ao desenvolvimento da presente dissertação realizou-se primeiramente à escala laboratorial, na unidade laboratorial de digestão anaeróbia (ULDA) do Instituto Superior de Agronomia, e seguidamente por contato com o engenheiro responsável da Área de Investigação e Desenvolvimento da Águas de Portugal. Assim, entendeu-se necessária a recolha e caraterização dos seguintes materiais:

- Lamas mistas de ETAR para obtenção de dados relativos a produção de biogás em ULDA.
- Co-substratos para obtenção de dados relativos a produção de biogás em regime de co-digestão em ULDA.
- Consumos energéticos inerentes à tecnologia de digestão anaeróbia em ULDA (bomba de alimentação, agitação do digestor e aquecimento do digestor).
- Consumos energéticos e produção de biogás inerentes ao funcionamento de uma ETAR (consumo diário da ETAR, consumos categorizados por tratamento de AR, consumo geral, produção de biogás).

3.1.1 A unidade laboratorial de digestão anaeróbia (ULDA)

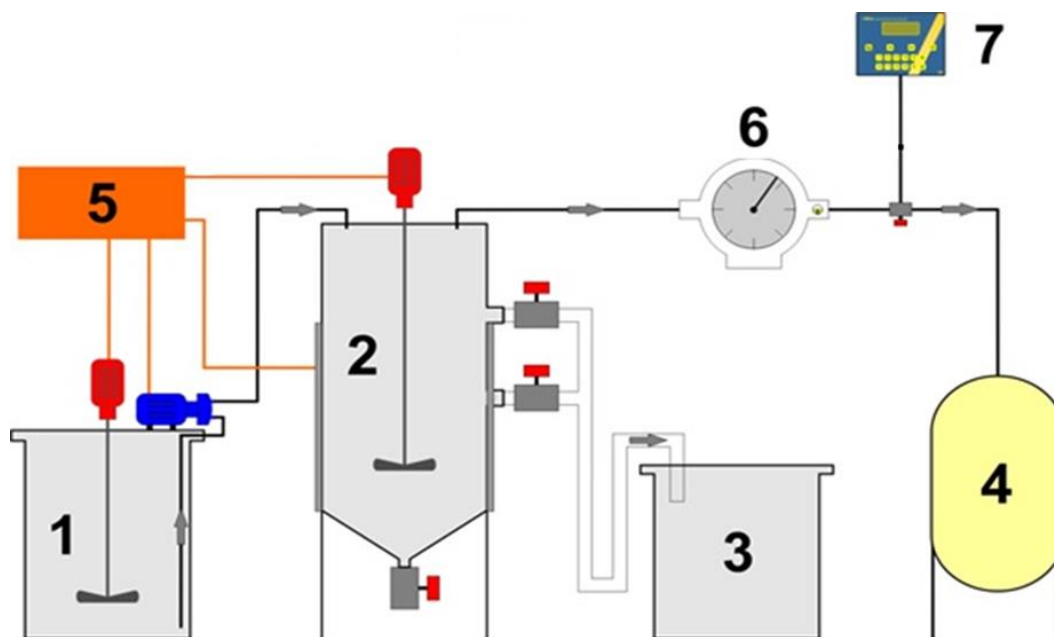


Figura 3.2 – Unidade laboratorial de digestão anaeróbia do Instituto Superior de Agronomia. Fonte: Carvalho, et al. 2016.

O esquema apresentado na Figura 3.2 ilustra o equipamento utilizado para a realização dos ensaios de digestão e co-digestão anaeróbia. Foi igualmente efetuada a medição dos consumos energéticos inerentes à tecnologia de DA. A ULDA apresenta a seguinte constituição:

1. Depósito de alimentação: local onde ocorre a mistura de substratos que irão alimentar o reator anaeróbio.
2. Reator anaeróbio CSTR: reator de mistura completa escolhido para realização da digestão anaeróbia, onde a mistura de substratos proveniente da alimentação é tratada, com consequente produção de biogás e digerido com potencial valorização agronómica.
3. Depósito de efluente digerido: local onde é recolhido o digerido proveniente do reator CSTR.
4. Depósito de recolha de biogás: é o local que armazena o biogás produzido no reator anaeróbio (armazenamento em água).
5. Painel de controlo: instrumento que controla o funcionamento dos aparelhos elétricos e eletrónicos inerentes ao funcionamento da ULDA.
6. Contador de biogás produzido: instrumento de medição analógico que determina de forma cumulativa a quantidade de biogás produzida no processo de digestão anaeróbia.
7. Analisador de qualidade do biogás: instrumento eletrónico que determina a percentagem de CH₄, CO₂, H₂S e N₂ presentes no biogás produzido.

Apresentam-se as características de funcionamento do reator CSTR de mistura completa:

- **Tipo de Reator:** CSTR (Mistura Completa)
- **Volume do Reator:** 16 L
- **Volume útil do Reator:** 11,6 L
- **Tempo de Retenção Hidráulico:** 15 dias
- **Caudal de alimentação:** 0,8 L/dia
- **Regime de alimentação:** Diário.
- **Regime de Temperatura:** Mesofílico (35 a 37 °C)

3.1.2 Recolha e caracterização de Lamas Mistas de ETAR para obtenção de dados relativos à produção de biogás em ULDA

A Tabela 3.1 apresenta as características médias das lamas mistas de ETAR recolhidas e caracterizadas por investigadores do Instituto Superior de Agronomia. Este primeiro ensaio servirá como cenário de referência.

Tabela 3.1 – Caracterização das lamas mistas de ETAR (cenário de referência). Fonte: ULDA do Instituto Superior de Agronomia (professora Elizabeth D’Almeida Duarte)

Caraterização	pH	CE (mS cm ⁻¹)	CQO Bruto (g L ⁻¹)	SVT (g L ⁻¹)	C/N
Lamas Mistas	6,9 ± 0,8	12,7 ± 1,2	26,8 ± 2,1	20,4 ± 3,1	7,9 ± 0,4

3.1.3 Recolha, caracterização e pré-tratamento de co-substratos para obtenção de dados relativos à produção de biogás em regime de co-digestão em ULDA

Co-substrato é um substrato orgânico que se pretende juntar ao substrato de alimentação do reator/digestor (neste caso as lamas mistas de ETAR) no processo de digestão anaeróbia na intenção de potenciar a quantidade e qualidade do biogás a produzir, apresentando também a capacidade de corrigir eventuais desequilíbrios físico-químicos e/ou presença de substâncias inibidoras existentes nas características do substrato base de alimentação do reator anaeróbio.

A metodologia para iniciar o regime de co-digestão passou por selecionar determinados co-substratos com o objetivo de realizar um ensaio laboratorial para obtenção de dados relativos à produção de biogás em regime de co-digestão. Foi seguidamente realizado um pré-tratamento aos co-susbtratos selecionados de modo a adaptá-los para seguidamente poderem ser homogeneizados com o substrato de alimentação.

Selecionou-se um pré-tratamento mecânico para preparar os co-susbtratos. O pré-tratamento mecânico passa por triturar o co-substrato na intenção de desintegrar o material constituinte, melhorando a fase da hidrólise do processo de digestão anaeróbia ao facilitar a sua solubilização.

A escolha do pré-tratamento mecânico deve-se essencialmente à sua simplicidade e baixo custo de implementação e utilização.

A Tabela 3.2 caracteriza a mistura de alimentação no ensaio de co-digestão realizado, contemplando os co-substratos selecionados.

Tabela 3.2 – Caracterização dos co-substratos selecionados para co-digestão anaeróbia (ensaio de co-digestão). Fonte: ULDA do Instituto Superior de Agronomia (professora Elizabeth D’Almeida Duarte)

Caraterização	pH	CE (mS cm⁻¹)	CQO Bruto (g L⁻¹)	SVT (g L⁻¹)	C/N
Lamas Mistas (LM)	6,2 ± 0,6	11,5 ± 1,5	20,1 ± 1,2	15,2 ± 1,3	6 ± 0,6
Co-substrato X	6,1 ± 0,5	3,4 ± 0,7	19 ± 1,4	12,6 ± 1,3	32 ± 4,3
Co-substrato Y	12,7 ± 0,7	14,5 ± 1	49 ± 2,5	25,4 ± 3	22,8 ± 5,7
Mistura de Alimentação (40:35:25)	7,6 ± 0,2	9,4 ± 2,3	23,6 ± 3,1	16,8 ± 1,6	18,4 ± 2,1

As percentagens de substratos na alimentação são 40% de LM, 35% de co-substrato X e 25% de co-substrato Y. Objetiva-se a obtenção de dados de produção de biogás em regime de co-digestão, com vista à sua comparação com os dados obtidos no cenário de referência.

A recolha e caracterização de LM e co-substratos, bem como os ensaios laboratoriais para obtenção dos dados de produção de biogás foram realizados por investigadores do Instituto Superior de Agronomia que trabalham na temática da digestão anaeróbia e co-digestão anaeróbia.

3.1.4 Recolha de dados relativos a consumos energéticos inerentes à tecnologia de digestão anaeróbia em ULDA

Utilizou-se um instrumento eletrónico trifásico, analisador de grandezas elétricas, com o objetivo de medir os consumos energéticos inerentes à tecnologia de DA em ULDA. O instrumento foi ligado a três aparelhos elétricos monofásicos consumidores de energia elétrica no processo de digestão anaeróbia.

Foram efetuados dois ensaios em ULDA com vista à recolha de dados de consumos energéticos. O primeiro ensaio realizou-se entre os dias 24 e 27 de novembro (4 dias), funcionando como ensaio exploratório, e o segundo realizou-se entre os dias 30 de março e 7 de abril (9 dias).

O instrumento gerou como output um ficheiro de Excel onde apresentou dados de tensão, corrente, potência e consumo energético dos três aparelhos medidos, em intervalos de minuto a minuto. Apresenta-se uma fotografia (Figura 3.3) da instalação do instrumento da marca Chauvin Arnoux, modelo C.A 8335.



Figura 3.3 – Fotografia da instalação do instrumento de medição de consumos elétricos.

3.1.5 Recolha de dados relativos a consumos energéticos e produção de biogás referentes à ETAR de Frielas

Com vista ao estudo de implementação das medidas tecnológicas propostas, nomeadamente de um regime de co-digestão anaeróbia e de um sistema solar fotovoltaico em regime de autoconsumo, requisitaram-se dados de consumo energético e produção de biogás relativos à ETAR de Frielas.

A seleção da ETAR de Frielas teve como base ser uma estação exemplar para o desenvolvimento do estudo proposto, dado o seu consumo energético intensivo e a prática de digestão anaeróbia em regime de co-geração para autoconsumo. Outro fator importante é a disponibilidade que os reatores anaeróbios da ETAR apresentam para receber maior quantidade de substrato, essencial para a implementação do regime de co-digestão anaeróbia, visto que desta forma se poderá acrescentar co-substrato sem comprometer o normal escoamento das lamas mistas produzidas.

A co-geração é, no presente, a tecnologia de conversão de energia mais praticada em ETAR pela capacidade que apresenta em produzir simultaneamente energia elétrica e térmica, esta última que servirá integralmente para o aquecimento dos reatores anaeróbios. A prática de co-geração permitirá tecer uma análise comparativa entre a digestão anaeróbia simples (tradicional) atualmente praticada e a implementação de co-digestão anaeróbia proposta na presente dissertação.

A ETAR de Frielas, situada em Loures, recebe e trata as águas residuais domésticas e industriais dos municípios de Lisboa, Amadora, Loures, Odivelas e Vila Franca de Xira, na bacia hidrográfica do Rio Trancão. Serve ainda parte dos municípios de Mafra e Sintra. Apresenta os seguintes parâmetros de dimensionamento e funcionamento atual:

- Dimensionamento:

- População = 700.000 HE.
- Caudal médio diário = 70.000 m³/d
- Caudal em tempo húmido = 6.000 m³/h
- Remoção de carbono + desinfecção:
 - CQO < 125 mg/L
 - CBO₅ < 25 mg/L
 - SST < 35 mg/L
 - Coliformes fecais < 2.000/100 mL

- Funcionamento atual:

- População = 250.000 HE.
- Caudal médio diário = 50.000 m³/d
- Caudal de tempo húmido > 6.000 m³/h

A Figura 3.4 ilustra a configuração da ETAR de Frielas.



1. Bombas de parafuso e crivos
2. Remoção de óleos e gorduras
3. Decantadores laminares
4. Bombas de parafuso
5. Tanques de equalização
6. Sistema de lamas ativadas
7. Decantadores Secundários
8. Bombagem e biofiltros
9. Sistema de desinfecção
10. Espessadores gravíticos
11. Espessadores por flotação
12. Digestores anaeróbios
13. Gasómetros
14. Sistema de desidratação de lamas

Figura 3.4 – Configuração da ETAR de Frielas acompanhada da respetiva legenda indicativa dos equipamentos para tratamento de águas residuais. Fonte: EPAL.

Os dados recolhidos junto do engenheiro representante da entidade gestora da ETAR (EPAL) foram os seguintes:

- Pressupostos inerentes à produção de energia com biogás em motores de co-geração.
- Perfil de consumos elétricos do ano de 2014, registados em períodos de 15 minutos.
- Tarifa tetra-horária para a energia elétrica.
- Quantidade produzida ($\text{m}^3/\text{mês}$), qualidade após purificação para remoção de H_2S (% CH_4 , % CO_2 , % O_2 , % N_2 , ppm H_2S) e respetiva conversão em energia elétrica (kWh) do biogás produzido no processo de digestão anaeróbia em 2014.

3.2 Método de cálculo das tarifas tetra-horárias simplificadas

Foram calculadas duas tarifas tetra-horárias simplificadas. Determinou-se o valor médio das tarifas a aplicar nos cálculos da poupança (€) inerente à produção de energia elétrica em motores de co-geração e no sistema solar fotovoltaico, ambos em regime de autoconsumo. O ciclo diário tetra-horário fornecido pela entidade gestora da ETAR é apresentado na Figura 3.5.



Figura 3.5 – Ciclo diário tetra-horário em vigor na ETAR. Fonte: EPAL

As tarifas a aplicar nos períodos horários compreendidos na tarifa tetra-horária constam na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Períodos horários e tarifas associadas compreendidos na tarifa tetra-horária. Fonte: EPAL

Períodos	Inverno (€/kWh)	Verão (€/kWh)
Vazio	0,0682	0,0684
Super Vazio	0,0581	0,0584
Cheia	0,0904	0,0905
Ponta	0,1008	0,1005

O cálculo das tarifas simplificadas entende as seguintes premissas:

- A tarifa tetra-horária simplificada a considerar na produção contínua de energia em co-geração implica a consideração de todos os períodos tarifários aplicados durante as 24 horas do dia, para as duas épocas do ano.
- A tarifa tetra-horária simplificada a considerar na produção de energia pelo sistema solar fotovoltaico implica a consideração dos períodos tarifários aplicados durante as principais horas de produção fotovoltaica, compreendidas entre as 8 e as 17 horas.

O método de cálculo das tarifas tetra-horárias simplificadas a aplicar nos cálculos de poupança proveniente da produção interna para autoconsumo foi o seguinte:

- Autoconsumo proveniente de co-geração: calculou-se a média de todas as tarifas praticadas ao longo das 24 horas do dia para os dois períodos legais (Verão e Inverno).
- Autoconsumo proveniente do sistema solar fotovoltaico: calculou-se a média das tarifas praticadas entre as 8 e as 17 horas para os dois períodos legais (Verão e Inverno).

3.3 Método de elaboração dos cenários energéticos em estudo na ETAR

O fluxograma ilustrado na Figura 3.6 estrutura o método utilizado para elaboração dos dois cenários energéticos em estudo na ETAR, apresentando de forma sequencial a metodologia de cálculo dos parâmetros considerados necessários.

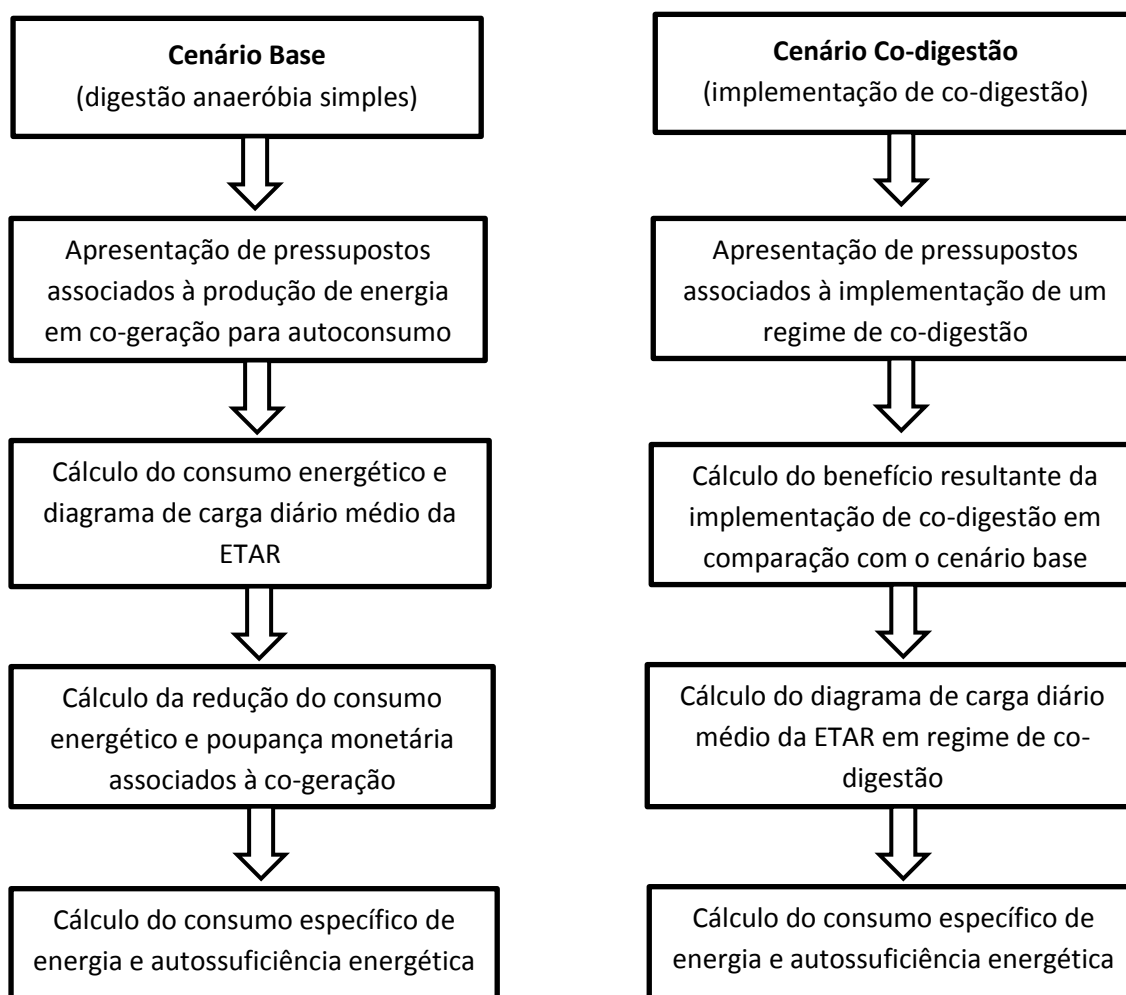


Figura 3.6 – Fluxograma ilustrativo do método utilizado para a elaboração dos cenários energéticos.

3.3.1 Tratamento de dados recolhidos na ETAR para elaboração do Cenário Base

O cenário base corresponde ao cenário energético da ETAR no ano de 2014, equivalente ao cenário atual, em que se a pratica digestão anaeróbia simples (convencional) para produção de biogás que é aplicado em motores de co-geração para produção combinada de energia térmica e elétrica em regime de autoconsumo. A energia térmica é totalmente direcionada para o aquecimento do reator anaeróbio e a energia elétrica é totalmente autoconsumida de forma a reduzir as necessidades de energia elétrica proveniente da RESP.

São apresentados na Tabela 3.4 os pressupostos associados à produção de energia com biogás em regime de co-geração para autoconsumo praticado na ETAR, fornecidos pela entidade gestora.

Tabela 3.4 – Pressupostos associados à produção de energia com biogás em regime de co-geração para autoconsumo. Fonte: EPAL.

Pressupostos		
Rácio energia elétrica/produção biogás	1,8	kWh/m ³
PCI biogás	6	kWh/m ³
Potência elétrica motor-gerador	500	kW
Rendimento elétrico CG	0,3275	%
Rendimento térmico CG	0,45	%
Rendimento térmico Caldeira	0,85	%
Temperatura ambiente inverno	10	°C
Temperatura ambiente verão	20	°C
Temperatura das lamas (inverno)	17	°C
Temperatura das lamas (verão)	22	°C
Custo aquisição/venda de energia elétrica	0,08125	€/kWh

O funcionamento anual da co-geração apresenta os seguintes pressupostos:

- 2 meses (mais frios): 2/3 do biogás utilizados em co-geração.
- 1 mês parado para manutenção.
- 9 meses de funcionamento em pleno.

Os dados recolhidos em ETAR foram trabalhados de forma a calcular os seguintes parâmetros:

- Consumo energético (kWh) e diagrama de carga diário médio (kW) da ETAR praticando co-geração em regime de autoconsumo.
- Redução do consumo de energia elétrica proveniente da RESP (kWh) e poupança monetária (€) associadas à prática co-geração em regime de autoconsumo.

Cálculo do consumo energético e diagrama de carga diário médio da ETAR

De forma a determinar o consumo energético da ETAR e elaborar o diagrama de carga diário médio, procedeu-se ao tratamento do perfil energético fornecido na forma de dados de potência ativa (kW) em intervalos de 15 minutos, ao longo do ano de 2014.

Importante referir que o perfil energético fornecido corresponde ao consumo de energia elétrica proveniente da RESP, ou seja, reflete a redução das necessidades energéticas da ETAR proporcionada pela produção interna de energia elétrica proveniente da produção de biogás por DA simples (tradicional) em regime de co-geração para autoconsumo.

O método utilizado para o tratamento dos dados suprarreferidos começa pelo cálculo do consumo energético correspondente ao valor de potência ativa fornecido para cada intervalo de tempo (Equação 13). Desta forma, obtiveram-se os valores de consumo energético em intervalos de 15 minutos para o ano de 2014.

$$\text{Consumo energético (kWh)} = P(\text{kW}) \times \Delta T \quad (13)$$

De forma a organizar os dados apresentados em intervalos de 15 minutos, procedeu-se à criação de uma tabela dinâmica em Excel, onde se calcularam os valores médios de potência ativa (kW) e os somatórios do consumo energético (kWh), agrupando os valores por ano, mês, dia e hora. A tabela dinâmica elaborada em Excel permitiu obter o consumo energético (kWh) e a média de potência ativa (kW) para cada mês do ano de 2014.

Para elaboração do diagrama de carga diário da ETAR, estimou-se um dia representativo da média de potência ativa (kW) verificada em cada mês. Foram extraídos os valores de potencia ativa (kW) referentes a cada hora do dia representativo de cada mês do ano. A média desses valores constitui o diagrama de carga diário médio da ETAR praticando DA simples em regime de co-geração para autoconsumo. Os valores calculados constam na tabela em Anexo I.

Cálculo da redução do consumo de energia elétrica proveniente da RESP (kWh) e poupança monetária (€)

Calculou-se a redução do consumo de energia elétrica proveniente da RESP e poupança monetária proporcionadas pela produção de energia elétrica no regime de co-geração para autoconsumo, durante o ano de 2014. Seguidamente, refere-se a metodologia adotada para o cálculo dos parâmetros suprarreferidos, apresentados na tabela em Anexo II.

- Caudal Afluyente ETAR (m³)

Representa os valores mensais referentes ao caudal afluyente à ETAR. Os dados foram retirados do relatório e contas da SIMTEJO (agora EPAL) para 2014.

- Consumo da ETAR praticando DA simples [Consumo ETAR (DA simples) (kWh)]

Refere-se ao consumo de energia elétrica da ETAR praticando DA simples em regime de co-geração para autoconsumo. Os dados foram fornecidos pela entidade gestora e tratados como demonstrado na Equação 13.

- Produção de energia elétrica em co-geração [Cogeração Biogás (DA simples) (kWh)]

Corresponde à produção de energia elétrica em co-geração. Os dados foram fornecidos pela entidade gestora da ETAR.

- Consumo energético total da ETAR [Consumo ETAR (Total) (kWh)]

Corresponde ao consumo energético total da ETAR, não contabilizando a produção de energia em co-geração para autoconsumo.

- Poupança monetária proveniente da produção de energia em co-geração [Poupança (DA simples) (€)]

Representa a poupança monetária (€) resultante da produção de energia elétrica em co-geração para autoconsumo. Calculou-se pela multiplicação entre a produção de energia em co-geração e a tarifa tetra-horária simplificada estimada para o efeito no ponto 3.6 (Equação 14).

$$Poupança\ Cogeração\ (€) = Produção\ Cogeração \times Tarifa \quad (14)$$

- Redução do consumo energético resultante da produção de energia em co-geração [Redução Consumo (DA simples) (%)]

Corresponde à redução percentual do consumo de energia elétrica proveniente da RESP, proporcionada pela prática de co-geração para autoconsumo (Equação 15).

$$\begin{aligned} & \text{Redução Consumo (DA simples) (\%)} \\ &= \left(\frac{\text{Consumo ETAR Total} - \text{Consumo ETAR (DA simples)}}{\text{Consumo ETAR Total}} \right) \quad (15) \\ & * 100 \end{aligned}$$

3.3.2 Elaboração do Cenário Co-digestão

O cenário energético de co-digestão corresponde ao estudo de implementação de um regime de co-digestão anaeróbia na ETAR de Frielas, tendo como suporte os valores do ano 2014 utilizados para elaboração do cenário base. Pretende-se demonstrar o benefício inerente à prática de co-digestão anaeróbia e estimar um diagrama de carga diário médio, necessário ao dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico apropriado ao cenário desenvolvido.

O estudo de implementação do regime de co-digestão anaeróbia entende as seguintes premissas:

- O estudo tem como base científica os valores recolhidos em ULDA.
- O reator anaeróbio apresenta volume útil não utilizado suficiente para receber a quantidade determinada de co-substrato sem comprometer o volume a ocupar pelas lamas mistas geradas no processo de tratamento da ETAR.
- O gasto energético associado ao funcionamento das estruturas inerentes à prática de co-digestão anaeróbia não foi considerado pois deverá ser compensado pelo melhoramento do desempenho do processo relacionado com efeito de “*scale up*” que se verifica com a passagem da escala laboratorial para a escala real.

Cálculo do benefício resultante da implementação do cenário co-digestão em comparação com o cenário base

Apresentam-se os parâmetros e métodos de cálculo efetuados para demonstração do benefício resultante da implementação de um regime de co-digestão, relativamente ao cenário base de digestão anaeróbia simples. Os parâmetros calculados integram a tabela em Anexo II.

- Produção de energia elétrica em co-geração com biogás produzido em regime de co-digestão [Co-geração Biogás (Co-digestão) (kWh)]

Representa a produção de energia elétrica em co-geração com biogás produzido em regime de co-digestão anaeróbia. É calculado com base nos resultados obtidos em ULDA, sendo que o valor de produção de energia elétrica em regime de digestão anaeróbia simples (cenário base) foi aumentado de acordo com o aumento percentual de produção de biogás e biometano reportados no ensaio laboratorial de co-digestão anaeróbia.

- Consumo energético da ETAR com um regime de co-digestão [Consumo ETAR (Co-digestão) (kWh)]

Estimou-se o consumo energético da ETAR em regime de co-digestão anaeróbia. É calculado subtraindo ao consumo total da ETAR a produção de energia proveniente da co-geração com biogás produzido em regime de co-digestão anaeróbia.

- Poupança monetária com um regime de co-digestão [Poupança (Co-digestão) (€)]

Estimou-se a poupança monetária resultante da co-geração com biogás produzido em regime de co-digestão anaeróbia multiplicando a produção de energia elétrica gerada em co-geração pela tarifa tetra-horária simplificada calculada para o efeito no ponto 3.6. O aumento da poupança monetária, relativamente ao cenário base, calculou-se pela diferença entre a poupança monetária verificada nos dois cenários energéticos.

- Redução do consumo energético proporcionada pela implementação de um regime de co-digestão [Redução Consumo (Co-digestão) (%)]

Estimou-se a redução percentual do consumo energético com a implementação do cenário de co-digestão, relativamente ao cenário base (DA simples) e ao consumo energético total da ETAR.

Cálculo do diagrama de carga diário médio da ETAR para o cenário co-digestão

O diagrama de carga diário médio da ETAR em cenário de co-digestão foi estimado através do diagrama de carga desenvolvido para o cenário base. Os valores de potência ativa do diagrama de carga elaborado para o cenário base foram reduzidos em função da percentagem de redução do consumo energético apurada com a implementação de um regime de co-digestão anaeróbia. Os valores calculados constam na tabela em Anexo III.

3.3.3 Cálculo do consumo específico de energia e autossuficiência energética nos dois cenários energéticos

O consumo específico de energia e a autossuficiência energética foram calculados com base nos parâmetros inerentes a cada um dos cenários energéticos referidos no ponto 3.7.2 da dissertação.

- Consumo específico de energia (kWh/m³)

É o consumo de energia necessário ao tratamento de 1 m³ de AR. Foi calculado o consumo específico total da ETAR e o consumo específico com produção de energia em co-geração nos dois cenários energéticos pela razão entre o consumo energético anual da ETAR nos vários cenários e o caudal afluente anual.

- Autossuficiência energética (%)

Calculou-se a percentagem de autossuficiência energética da ETAR proporcionada pela prática de co-geração em regime de autoconsumo nos dois cenários energéticos (Equação 16).

$$\text{Autossuficiência (\%)} = \frac{\text{Produção de energia (co-geração)}}{\text{Consumo total}} \times 100 \quad (16)$$

3.4 Método de dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico em regime de autoconsumo para cada um dos cenários energéticos

Dimensionou-se um sistema solar fotovoltaico para cada um dos cenários energéticos desenvolvidos para a ETAR. O objetivo passou por comparar a solução de implementação singular de um sistema PV na ETAR com a solução em estudo proposta na presente dissertação de implementação integrada de um regime de co-digestão anaeróbia e de um sistema PV.

O sistema fotovoltaico é dimensionado com base nos diagramas de carga calculados para os dois cenários energéticos, representativos do consumo energético da ETAR proveniente da RESP. Os dados de irradiância e temperatura ambiente, assim como a inclinação e azimuth dos painéis fotovoltaicos foram recolhidos na aplicação PVGIS.

3.4.1 Cálculo dos parâmetros operacionais do módulo fotovoltaico

O módulo fotovoltaico selecionado corresponde ao módulo genérico utilizado no software PVsyst. As características do módulo constam na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Características do módulo fotovoltaico selecionado. Fonte: PVsyst.

Características do módulo PV	
e (eU)	1,12
P_{max} (w)	250
I_{max} (A)	8,14
U_{max} (U)	30,8
I_{cc} (A)	8,67
U_{ca} (U)	37,5
NOCT	45
NCS	60
η módulo [%]	15,36
Comprimento (m)	1,64
Largura (m)	0,992
Área (m2)	1,627

O método desenvolvido em Excel para o cálculo dos parâmetros operacionais do módulo PV começou por estimar a potência máxima DC do módulo, pelas seguintes expressões:

- Constante de Boltzmann.

$$k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

- Carga elétrica do eletrão.

$$q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

- Fator de idealidade do díodo.

$$m_1 = \frac{U_{max} - U_{ca}}{U_T \cdot \ln\left(1 - \frac{I_{max}}{I_{cc}}\right)} \quad (17)$$

- Potencial térmico.

$$U_T = \frac{k \cdot T}{q} \quad (18)$$

- Temperatura de referência.

$$T^r = 25 + 273,16 \text{ K} \quad (19)$$

- Temperatura da célula em Kelvin.

$$T_c = \theta_a + \frac{G \cdot (NOCT - 20)}{800} + 273,16 \text{ K} \quad (20)$$

- Corrente inversa de saturação.

$$I_0 = I_0^r \cdot \left(\frac{T_c}{T^r} \right)^3 \cdot e^{\frac{\varepsilon}{m'} \left(\frac{1}{V_T^r} - \frac{1}{V_T} \right)} \text{ A} \quad (21)$$

$$I_0^r = \frac{I_{CC}}{e^{\frac{U_{ca}}{1}}} \text{ A}$$

$$m' = \frac{m}{NCS} \quad (22)$$

- Tensão no ponto de potência máxima.

$$U_{m\acute{a}x} = m \cdot U_T \cdot \ln \left(\frac{(I_{CC}^r - I_{m\acute{a}x}^r)}{I_0} \cdot \frac{G}{1000} \right) \text{ V} \quad (23)$$

- Corrente no ponto de potência máxima.

$$I_{m\acute{a}x} = \frac{G}{1000} \cdot I_{m\acute{a}x}^r \text{ A} \quad (24)$$

- Potência máxima em DC.

$$P_{m\acute{a}x} = U_{m\acute{a}x} \times I_{m\acute{a}x} \text{ W} \quad (25)$$

Calculou-se a potência máxima em DC do módulo para cada hora de um dia representativo de cada mês do ano de 2014, com base nos dados de irradiância e temperatura ambiente recolhidos em PVGIS para a localização pretendida, através da elaboração de sucessivas tabelas com a seguinte ordem de cálculo:

1. Temperatura da célula em Kelvin.
2. Potencial térmico.
3. Corrente inversa de saturação.
4. Tensão no ponto de potência máxima.
5. Corrente no ponto de potência máxima.
6. Potência máxima em DC.

A potência AC (kW) é calculada com base na potência DC (W) produzida por cada módulo fotovoltaico, tendo em conta as perdas inerentes ao rendimento de conversão, pela Equação 26.

$$P_{ac} = \frac{P_{DC} \times \eta_{conversão} \times n^{\circ} \text{ módulos}}{1000} \text{ kW} \quad (26)$$

O rendimento de conversão compreende o rendimento do inversor e perdas inerentes (cabos, sujidade, etc). O valor standard global usado tanto no software PVGIS como no PVsyst e adotado no presente estudo é 86%. A produção fotovoltaica média diária em AC (P_{ac}), em kW, foi estimada para cada mês do ano de 2014 (ao longo de 24 horas) para os dois cenários energéticos.

3.4.2 Cálculo da produção fotovoltaica, autoconsumo, C_{upac} e poupança monetária anuais para os dois cenários energéticos

Elaboraram-se duas tabelas em Excel, correspondentes a cada um dos cenários energéticos, apresentando conjuntamente a produção fotovoltaica em AC (P_{ac}) em kW, o consumo energético diário representado pelo diagrama de carga diário médio da ETAR (kW) e o autoconsumo proporcionado pelo sistema fotovoltaico (kW), ao longo de 24 horas de um dia representativo de cada mês do ano de 2014. O objetivo passou por estimar o autoconsumo proporcionado pelo sistema fotovoltaico através do cálculo do mínimo entre a produção fotovoltaica e o consumo energético para cada hora do dia representante de cada mês do ano (Equação 27). As tabelas elaboradas constam nos Anexos IV, V, VI e VII.

$$\text{Autoconsumo PV} = \min(P_{ac}, \text{Consumo energético}) \text{ kWh} \quad (27)$$

A escolha da potência a instalar teve o objetivo de direcionar toda a produção para o autoconsumo da ETAR, evitando a venda de excedente à RESP, cujo preço de venda da energia praticado é 90% do preço da OMIE, inevitavelmente inferior ao valor da tarifa da energia elétrica comprado pela ETAR à rede. Assim, o presente estudo não contabiliza a possível receita proveniente da venda de excedente à RESP.

Os valores referentes ao consumo energético, produção fotovoltaica e energia autoconsumida anuais são extraídos das tabelas desenvolvidas em Excel, através do somatório dos 12 meses do ano de 2014. O valor anual de produção fotovoltaica em AC desenvolvido em Excel foi confirmado no software de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos PVsyst.

A $R_{a,poup}$ (€) é a receita considerada pela poupança relativa à produção fotovoltaica autoconsumida (kWh), tendo em consideração o valor da tarifa tetra-horária simplificada (€) calculado para o efeito no ponto 3.6. Calculou-se pela Equação 28.

$$R_{a,poup}(2014) = \text{Autoconsumo PV anual} \times \text{tarifa} \text{ €} \quad (28)$$

A compensação devida pela produção de energia elétrica em regime de autoconsumo calcula-se pela Equação 29. O $P_{UPac,m}$ considera-se como sendo a potência instalada. Considerou-se um k_T de 30%.

$$Cu_{Pac,m} = P_{UPac,m} \times k_T \times V_{cieg,t} \text{ €} \quad (29)$$

O valor do $V_{cieg,t}$ foi retirado diretamente da publicação da ERSE “Tarifas e preços para a energia elétrica e outros serviços em 2016” (página 112) e representado na Equação 30.

$$V_{cieg,2015} = 3,521 \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) / \text{mês} = 42,25 \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) / \text{ano} \quad (30)$$

3.4.3 Escolha do inversor e configuração do sistema solar fotovoltaico

A potência do inversor a instalar deverá estar compreendida entre 70% e 120% da potência fotovoltaica a instalar. Através do software PVsyst escolheu-se um inversor cuja potência máxima DC se adequa aos limites impostos pela a potência de pico (DC) instalada nos sistemas PV. O software devolveu seguidamente a configuração do sistema PV, com o respetivo número de *strings* e módulos em cada *string*, enquadrados nos limites máximos de segurança da célula.

3.4.4 Cálculo do autoconsumo e da autossuficiência energética dos sistemas fotovoltaicos dimensionados para cada um dos cenários energéticos

A percentagem de autoconsumo é calculada pela razão entre a produção fotovoltaica autoconsumida (kWh) e a produção fotovoltaica total (kWh) (Equação 31).

$$\text{Autoconsumo} = \frac{\text{Autoconsumo PV}}{\text{Produção PV}} \% \quad (31)$$

A autossuficiência gerada pelos sistemas fotovoltaicos dimensionados para cada um dos cenários energéticos foi estimada pelo cálculo da razão entre a produção fotovoltaica autoconsumida (kWh) e o consumo energético total da ETAR (kWh) (Equação 32).

$$\text{Autossuficiência} = \frac{\text{Autoconsumo PV}}{\text{Consumo ETAR Total}} \% \quad (32)$$

O objetivo de direcionar toda a produção fotovoltaica para o autoconsumo implicará o desenvolvimento dos sistemas solares fotovoltaicos com a condicionante de apresentarem o valor do parâmetro de autoconsumo igual a 100%.

3.5 Cálculo dos mapas de exploração financeira e autossuficiência energética gerada na implementação dos projetos associados aos cenários energéticos

Foram elaborados dois mapas de exploração financeira correspondentes aos projetos associados a cada um dos cenários energéticos desenvolvidos para a ETAR. Foi igualmente estimada a autossuficiência energética proporcionada pela implementação de cada um dos projetos. Desta forma será possível efetuar uma análise comparativa que verifique o benefício da implementação integrada de um regime de co-digestão anaeróbia e de um sistema solar fotovoltaico em regime de autoconsumo.

3.5.1 Cálculo dos mapas de exploração financeira dos projetos associados aos cenários energéticos

Os pressupostos considerados na elaboração dos mapas de exploração para os dois cenários apresentam-se seguidamente.

- Considerou-se um tempo de vida dos módulos fotovoltaicos de 25 anos e um tempo de vida para inversor de 15 anos, baseado na literatura e estudos de mercado.
- O custo por kWp instalado representativo do custo do investimento a realizar (painéis solares, suportes, inversor, etc) foi estabelecido no valor de 1300 €/kWp, baseado na literatura e estudos de mercado para a potência de pico a instalar nos sistemas PV.
- No 16º ano de vida do projeto é simulada a compra de novo inversor, com um custo de aproximadamente 92.000 € para o selecionado no cenário base e de aproximadamente 75.000 € para o selecionado no cenário co-digestão (transporte não incluído), apurado pela pesquisa de mercado efetuada na empresa *PROINSO*.
- Para o cenário co-digestão será contabilizado o investimento em implementação de infraestruturas e a autossuficiência e poupança anuais inerentes à sua implementação.
- É considerada a perda de rendimento anual do sistema fotovoltaico e do sistema de co-geração de 0,4% e um aumento anual da tarifa da energia elétrica de 2%.
- Os custos de operação e manutenção representam 0,5% do investimento inicial.
- É considerada uma taxa de atualização de 3%.
- O número de módulos a instalar nos sistemas fotovoltaicos foi otimizado em Excel recorrendo à ferramenta “Solver”, requisitando o máximo de taxa interna de rentabilidade do investimento com a condicionante de que o autoconsumo do sistema seja de 100%.

O custo em equipamento e infraestruturas necessários à implementação de um regime de co-digestão anaeróbia, representativo do investimento inicial, apresenta-se na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Custos de implementação do regime de co-digestão anaeróbia. Fonte: United States Environmental Protection Agency – Co-Digestion Economic Analysis Tool (CoEAT).

Equipamento	Custo (€)
Equipamento de pré-tratamento	400.000,00
Tanque	22.300,00
Bombas	8.920,00
Plataforma do tanque	10.705,00
Permutador de calor	4.460,00
Agitador	8.920,00
Canalizações	44.615,00
Instalação elétrica	24.091,00
TOTAL	524.000,00

Para elaboração dos mapas de exploração dos investimentos calcularam-se os parâmetros seguidamente apresentados.

- Cash-flow.

$$\text{Cash-flow} = R_{a,poup} - C_{upac} \text{ €} \quad (33)$$

- Cash-flow Atualizado.

$$\text{Cash-Flow Atualizado} = \frac{\text{Cash Flow}}{(1+i)^t} \text{ €} \quad (34)$$

Onde i é a taxa de atualização e t o ano; $i = 3\%$.

- Cash-flow Acumulado.

$$\begin{aligned} \text{Cash-Flow Acumulado} \\ = \text{Cash flow acumulado}_{t-1} + \text{Cash flow atualizado}_t \text{ €} \end{aligned} \quad (35)$$

- Valor Atual Líquido (VAL).

Corresponde ao cash-flow acumulado do último ano de vida útil do projeto.

- Tempo de Recuperação do Investimento (PRI)

Ano em que o Cash-Flow Acumulado se torna positivo.

- Taxa Interna de Rentabilidade (TIR)

Calculado com a função IRR do Excel considerando o Cash-Flow ao longo dos anos.

3.5.2 Autossuficiência energética gerada com a implementação dos projetos associados aos cenários energéticos

É estimada a autossuficiência energética gerada ao longo do tempo de vida dos projetos de implementação das soluções tecnológicas associadas a cada um dos cenários energéticos.

- Cenário base: Implementação de um sistema solar fotovoltaico em regime de autoconsumo

É considerada a autossuficiência energética gerada pelo sistema solar fotovoltaico dimensionado para o cenário base, contabilizando a perda de rendimento anual de 0,4%/ano.

- Cenário Co-digestão: Implementação integrada de um regime de co-digestão anaeróbia e de um sistema solar fotovoltaico em regime de autoconsumo

É considerada a autossuficiência energética gerada pela produção adicional de energia em co-geração (proporcionada pelo regime de co-digestão anaeróbia) e pelo sistema solar fotovoltaico dimensionado para o cenário co-digestão, ambos em regime de autoconsumo, contabilizando a perda de rendimento anual de 0,4%/ano (Equação 36).

$$Autossuficiência = \frac{Produção Adicional Cogeração + Autoconsumo PV}{Consumo ETAR Total} \% \quad (36)$$

Capítulo 4 Resultados – análise e discussão

No presente capítulo apresentam-se os resultados obtidos, com respetiva análise e discussão. O fluxograma ilustrado na Figura 4.1 apresenta a organização sequencial do trabalho desenvolvido.

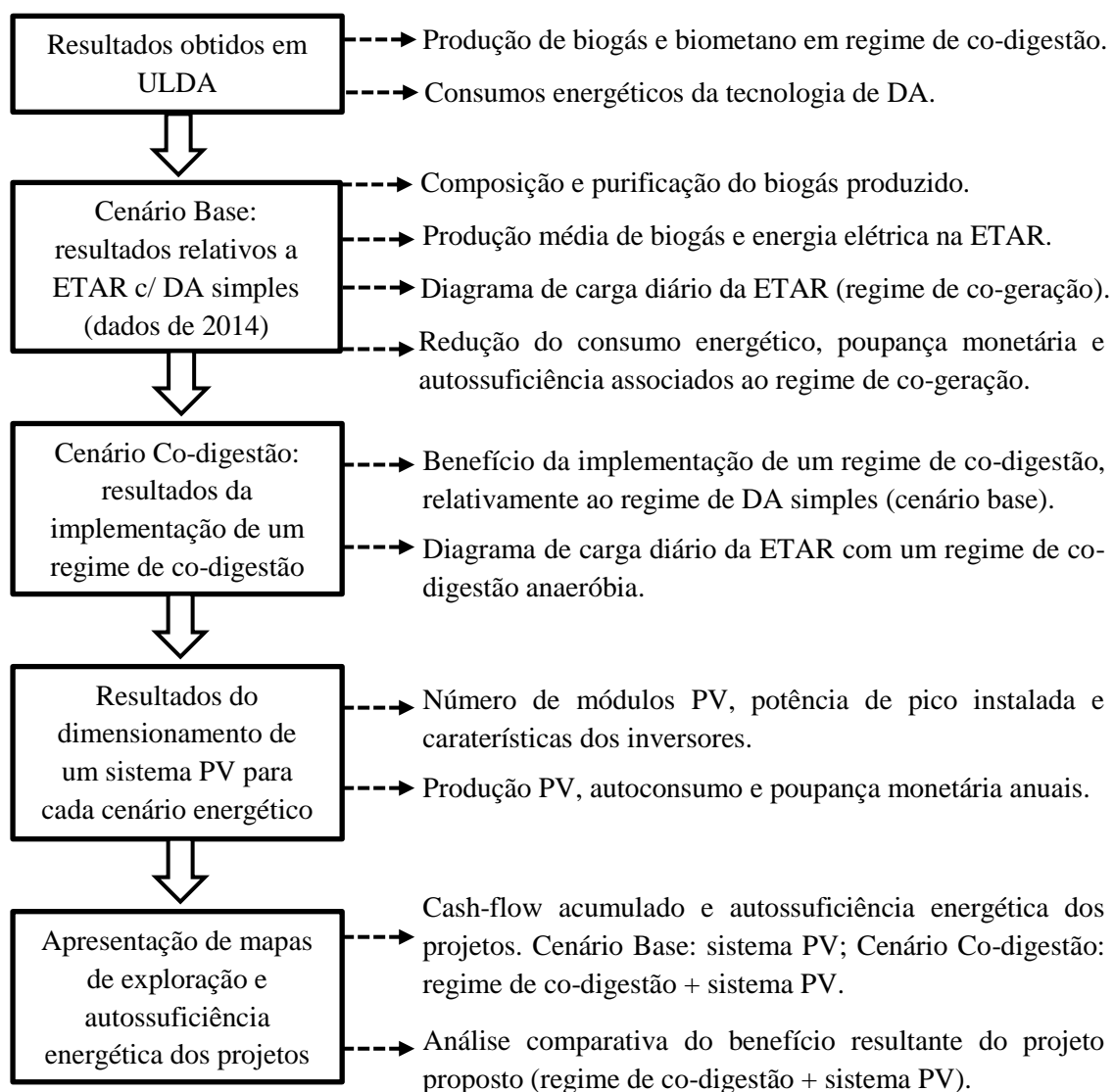


Figura 4.1 – Fluxograma ilustrativo da organização sequencial dos resultados apresentados.

4.1 Resultados obtidos em ULDA relativos a produção de biogás em regime de co-digestão anaeróbia

A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos em ULDA com a realização dos ensaios de digestão anaeróbia em regime tradicional (cenário de referência) e em co-digestão. É efetuada a comparação entre os parâmetros operacionais inerentes aos dois ensaios de forma a apurar as diferenças resultantes da implementação do regime de co-digestão anaeróbia.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de referência e de co-digestão. Comparação entre os parâmetros operacionais correspondentes.

Parâmetros	Cenário de referência	Ensaio de co-digestão	Diferenças
TRH (dias)	15	15	-
Q (L dia ⁻¹)	0,8	0,8	-
Temperatura Média	37	36	-
OLR (g SVT/Lreactor.dia)	1,41	1,12	Reduziu 21%
Produção média de biogás (L.dia ⁻¹)	2,83	5,66	Aumentou 100%
Produção média de metano (L.dia ⁻¹)	1,73	3,51	Aumentou 100%
GPR (Lbiogás/Lreactor)	0,24	0,49	Aumentou 100%
SGP (Lbiogás/gSVT)	0,17	0,64	Aumentou 300%
SMP (Lmetano/gSVT)	0,10	0,39	Aumentou 300%

Analisando a Tabela 4.1 é possível verificar que apesar da taxa de carga de carga orgânica (OLR) ter reduzido 21%, a produção específica de gás (SGP) quadruplicou.

Este parâmetro (SGP) demonstra o efeito muito positivo que a junção do co-substrato escolhido teve no melhoramento da qualidade da carga orgânica de alimentação, nomeadamente na fração biodegradável dos SVT (passível de degradação por parte dos microrganismos anaeróbios). Isto é, a junção do co-substrato aumentou a percentagem de matéria orgânica biodegradável presente na carga orgânica de alimentação.

Verificou-se a duplicação da produção média diária de biogás e biometano, visível também na análise comparativa da taxa de produção de gás (GPR), parâmetro indicativo da capacidade produtiva de cada litro de substrato de alimentação presente no reator.

4.2 Resultados obtidos em ULDA relativos a consumos energéticos inerentes à tecnologia de digestão anaeróbia

Apresentam-se os resultados relativos a consumos energéticos, medidos em Wh, inerentes ao processo de digestão anaeróbia desenvolvido na ULDA.

O gráfico ilustrado na Figura 4.2 representa o consumo elétrico diário medido na ULDA. É constituído por 5 dias de funcionamento típico da unidade laboratorial de digestão anaeróbia, selecionados de um leque de 2 ensaios experimentais que recolheram dados de 13 dias (4 dias em novembro e 9 dias em abril).

A seleção foi efetuada com base em resultados diários que abrangem as 24 horas do dia, excluindo fins de semana (onde não existe alimentação do digestor) e dias de ocorrências atípicas não representativos do funcionamento normal de uma unidade de digestão anaeróbia.

Os resultados de consumo elétrico diários apresentam-se categorizados por componente analisado. O seu somatório representa aproximadamente o consumo total da unidade.

A ULDA em termos de consumos energéticos não é exemplificativa de uma unidade de digestão anaeróbia presente numa ETAR, pois o efeito de escala é muito substancial na redução dos consumos. Neste sentido, a análise dos consumos da ULDA no presente estudo será direcionada no sentido de determinar o componente analisado que representa maior influência no consumo energético de uma unidade de digestão anaeróbia, o qual se nomeou de “ponto crítico”.

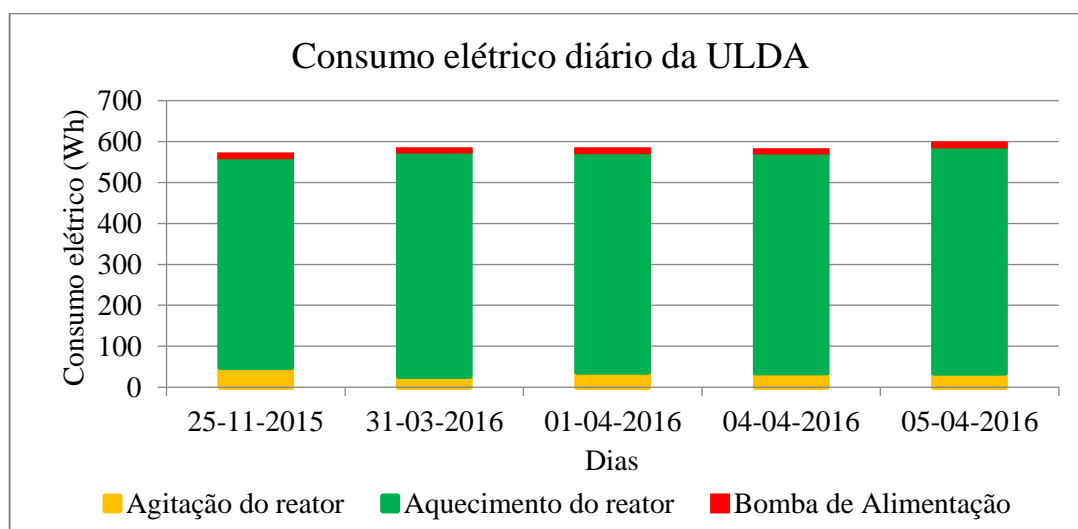


Figura 4.2 – Consumo elétrico diário de cada componente analisado e consumo elétrico diário total da ULDA.

A análise do gráfico (Figura 4.2) permite apurar que o aquecimento do reator é distintamente o mais influente no consumo elétrico total da ULDA. Complementando, o aquecimento do reator representa 93% – 94% do consumo energético total da ULDA. Esta informação permite perceber a representatividade do consumo energético inerente ao aquecimento do reator numa ETAR relativamente ao balanço energético da tecnologia.

O aquecimento em questão representa uma necessidade de energia térmica que, no caso da ULDA, é efetuado por manta térmica a revestir o reator, funcionando por energia elétrica. Este método é energeticamente menos eficiente do que o praticado em ETAR, onde o aquecimento é tipicamente feito por canalização de água quente no interior do reator, aquecida por permutação da energia térmica gerada em motores de co-geração ou por intermédio de uma caldeira.

O aquecimento do reator é parte fundamental do processo, pois é muito importante que o reator em regime mesofílico de temperaturas se mantenha a temperatura constante de aproximadamente 35°C, evitando variações acentuadas que comprometam o normal desenvolvimento das culturas microbianas.

O presente estudo salienta o consumo energético associado ao aquecimento do reator por acreditar que a integração de tecnologias de energia renovável poderá contribuir para uma significativa redução desse consumo, nomeadamente num cenário onde o biogás produzido em ETAR não é direcionado para motores de co-geração onde a produção de energia elétrica gera simultaneamente energia térmica capaz de satisfazer a necessidade de aquecimento do reator.

Este assunto será discutido no desfecho da dissertação, acompanhado de uma sugestão para trabalho futuro.

4.3 Cenário Base – resultados relativos à ETAR de Frielas

Apresentam-se os resultados obtidos no tratamento dos dados relativos à ETAR de Frielas referentes ao ano 2014, que constituem o cenário energético base, semelhante ao cenário atualmente verificado.

A ETAR produz biogás no processo de digestão anaeróbia simples (tradicional), direcionando-o para motores de co-geração em regime de autoconsumo na intenção de reduzir o consumo de energia elétrica proveniente da RESP.

4.3.1 Composição e purificação do biogás produzido

O biogás produzido no processo de digestão anaeróbia de lamas mistas na ETAR apresenta valores de composição variáveis, sendo que a presença de H₂S é devidamente reduzida através de um sistema de purificação *in situ*. A Tabela 4.2 apresenta os requerimentos de remoção de H₂S, dependendo do destino de utilização do biogás produzido. Os valores de composição do biogás produzido na ETAR são apresentados na Tabela 4.3, demonstrativa dos resultados antes e depois do processo de purificação, em 2014.

Tabela 4.2 – Requerimentos de remoção de H₂S, de acordo com a utilização do biogás. Fonte: Szmidt, et al. 2013.

Aplicação	Limites H ₂ S
Caldeira	< 1000 ppm
Motor Estacionário	< 250 ppm
Combustível automóvel	(Remoção total)
Rede de gás natural	(Remoção total)

Tabela 4.3 – Composição do biogás produzido antes e depois do sistema de purificação. Fonte: EPAL.

Data	Parâmetro	Standard	Antes do Sistema de Purificação	Depois do Sistema de Purificação	Unidade
16-01-2014	CH ₄	ASTM D 1946	62,4	62,1	% (v/v)
	CO ₂	ASTM D 1946	32	35,4	% (v/v)
	O ₂	ASTM D 1946	<0,5	<0,5	% (v/v)
	N ₂	ASTM D 1946	3,3	1,7	% (v/v)
	H ₂ S	ASTM D 6228	82	87	ppm
12-03-2014	CH ₄	ASTM D 1946	62,1	60,3	% (v/v)
	CO ₂	ASTM D 1946	33	32,2	% (v/v)
	O ₂	ASTM D 1946	<0,5	<0,5	% (v/v)
	N ₂	ASTM D 1946	4	5,8	% (v/v)
	H ₂ S	ASTM D 6228	19	10	ppm
13-08-2014	CH ₄	ASTM D 1946	62,8	62,2	% (v/v)
	CO ₂	ASTM D 1946	31,2	30,4	% (v/v)
	O ₂	ASTM D 1946	<0,5	0,9	% (v/v)
	N ₂	ASTM D 1946	3,7	6	% (v/v)
	H ₂ S	ASTM D 6228	82	68	ppm

Apresentam-se os métodos utilizados para determinação da composição do biogás produzido.

- Standard Test Method for Determination of Sulfur Compounds in Natural Gas and Gaseous Fuels by Gas Chromatography and Flame Photometric Detection (ASTM D 6228).
- Standard Practice for Analysis of Reformed Gas by Gas Chromatography (ASTM D 1946).

A análise da Tabela 4.3 permite verificar que o biogás produzido apresenta uma composição média de CH₄ de 61,2%, depois do sistema de purificação, valor que se revela próximo dos valores descritos na literatura. Verificou-se uma redução média de H₂S através do sistema de purificação de 13,8% (com um desvio padrão de 17,3%). Os valores de H₂S encontram-se abaixo do limite máximo recomendável, situado em 250 ppm para motores estacionários.

4.3.2 Produção média de biogás e energia elétrica em co-geração para autoconsumo mensalmente na ETAR, ao longo do ano de 2014

A Tabela 4.4 apresenta a produção de biogás e de energia elétrica em co-geração, em 2014.

Tabela 4.4 – Produção de biogás e de energia elétrica em co-geração, no ano de 2014. Fonte: Águas de Portugal. Agradecimento: EPAL.

Meses (2014)	Produção biogás (m ³)	Produção energia elétrica (co-geração) (kWh)
Janeiro	18.914	34.045
Fevereiro	45.408	81.734
Março	130.453	234.815
Abril	110.772	199.390
Mai	137.872	248.169
Junho	127.303	229.146
Julho	109.402	196.924
Agosto	145.794	262.412
Setembro	136.501	245.701
Outubro	114.269	205.685
Novembro	102.448	184.406
Dezembro	83.142	146.496
Total	1.262.278	2.268.923

A análise da Tabela 4.4 permite apurar uma produção de biogás total de 1.262.278 m³, convertidos em 2.268.923 kWh de energia elétrica em motores de co-geração. No período entre janeiro e fevereiro a produção esteve parada para manutenção do sistema de co-geração. Verifica-se que nos meses mais frios a produção de biogás reduz por se utilizar apenas 2/3 do biogás para co-geração e o restante em caldeira para aquecimento do reator, de forma a manter a sua temperatura próxima dos 35°C.

4.3.3 Diagrama de carga diário da ETAR em regime de co-geração em para autoconsumo, em 2014

Organizaram-se os dados recolhidos de potência ativa em intervalos de 15 minutos, referentes ao ano de 2014, com a criação de uma tabela dinâmica em Excel, onde se calcularam os valores médios de potência e os somatórios do consumo energético, numa organização que agrupa os valores por ano, meses, dias e horas. A Tabela 4.5 apresenta os valores médios de potência ativa (kW) e o consumo energético (kWh) em intervalos mensais do ano 2014.

Tabela 4.5 - Média mensal de potência ativa (kW) e somatório mensal de consumos energéticos (kWh) em 2014. Fonte: EPAL.

Meses (2014)	Média de potência ativa (kW)	Consumo energético (kWh)
Janeiro	945	702.109
Fevereiro	953	640.096
Março	834	619.636
Abril	858	617.537
Maio	818	608.438
Junho	868	625.215
Julho	922	686.274
Agosto	788	586.473
Setembro	792	570.286
Outubro	714	531.559
Novembro	728	523.292
Dezembro	891	662.606
Total	842	7.373.518

A análise da Tabela 4.5 permite verificar a média de potência ativa (kW) para os meses do ano 2014. A média de potência anual foi de 842 kW e o consumo energético anual de 7.363.518 kWh.

Para elaboração do diagrama de carga elétrica diário da ETAR utilizou-se um dia representativo da média de potência ativa (kW) verificada em cada mês (Anexo I). O diagrama de carga elétrica diário é fundamental para o dimensionamento de um sistema fotovoltaico em regime de autoconsumo, como o que se propõe instalar na presente dissertação.

Calculou-se a média de potência ativa (kW) para cada hora do dia durante o ano para elaboração de um gráfico representativo do diagrama de carga médio da ETAR, ilustrado na Figura 4.3.

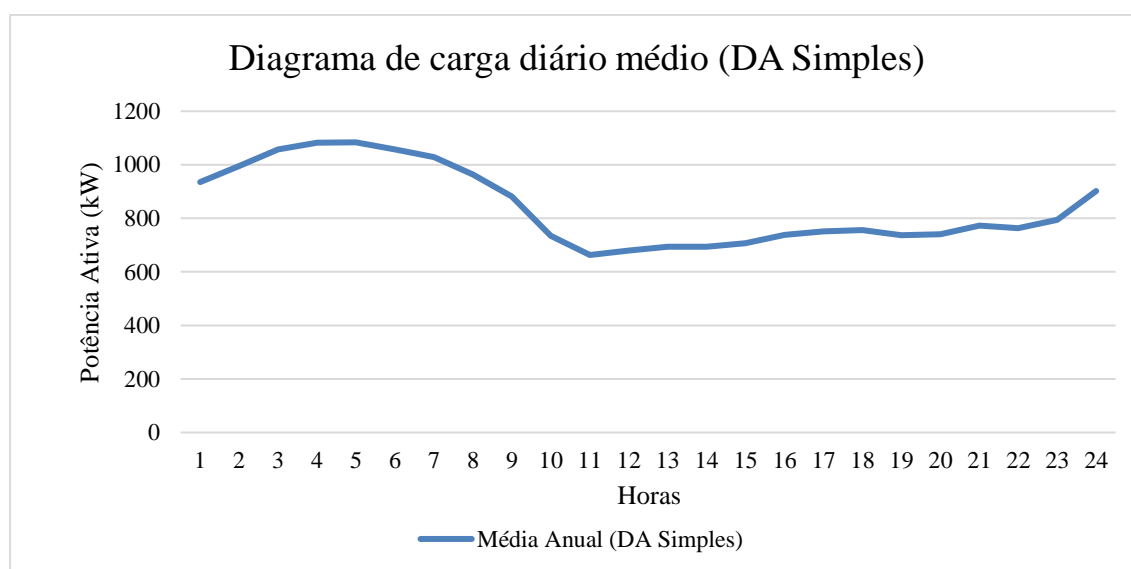


Figura 4.3 – Diagrama de Carga diário médio da ETAR no ano de 2014.

O gráfico ilustrado na Figura 4.2 demonstra uma previsão para deslocalizar o consumo para horas onde a tarifa da energia elétrica é mais reduzida, nomeadamente as horas de vazio e super vazio.

4.3.4 Redução do consumo energético, poupança monetária e autossuficiência energética associados à produção de biogás em regime de co-geração para autoconsumo

Os gráficos ilustrados nas Figuras 4.4 e 4.5, efetuados com base na tabela em Anexo II, pretendem demonstrar a redução do consumo energético da ETAR resultante da prática de co-geração para autoconsumo, funcionando com biogás produzido no processo de digestão anaeróbia simples/tradicional (valores correspondentes ao ano 2014).

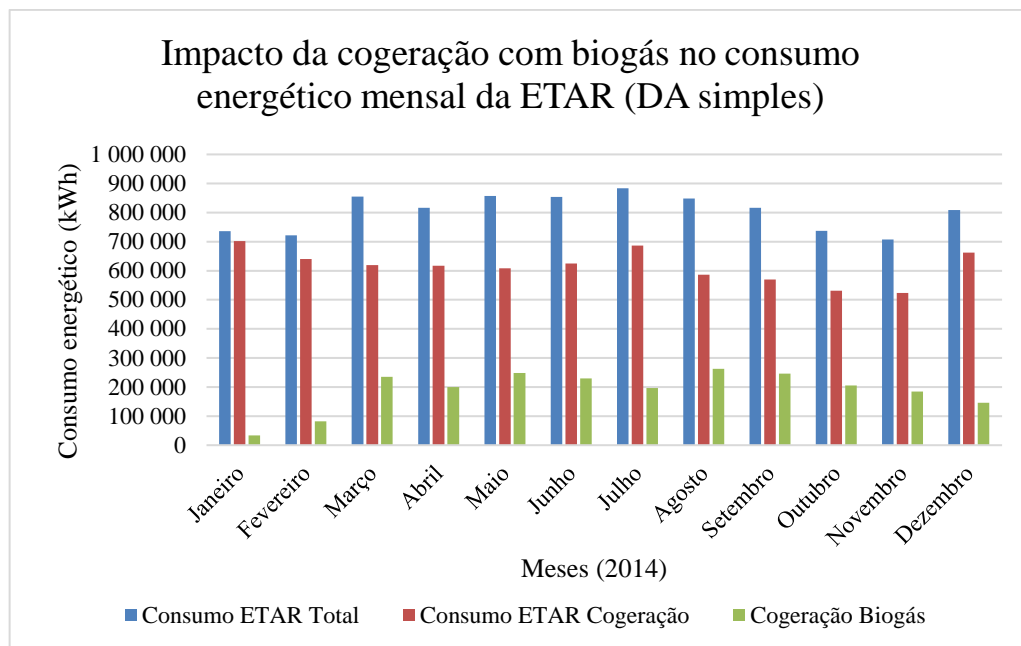


Figura 4.4 – Impacto da co-geração com biogás produzido no processo de DA simples na redução do consumo energético da ETAR ao longo do ano 2014.

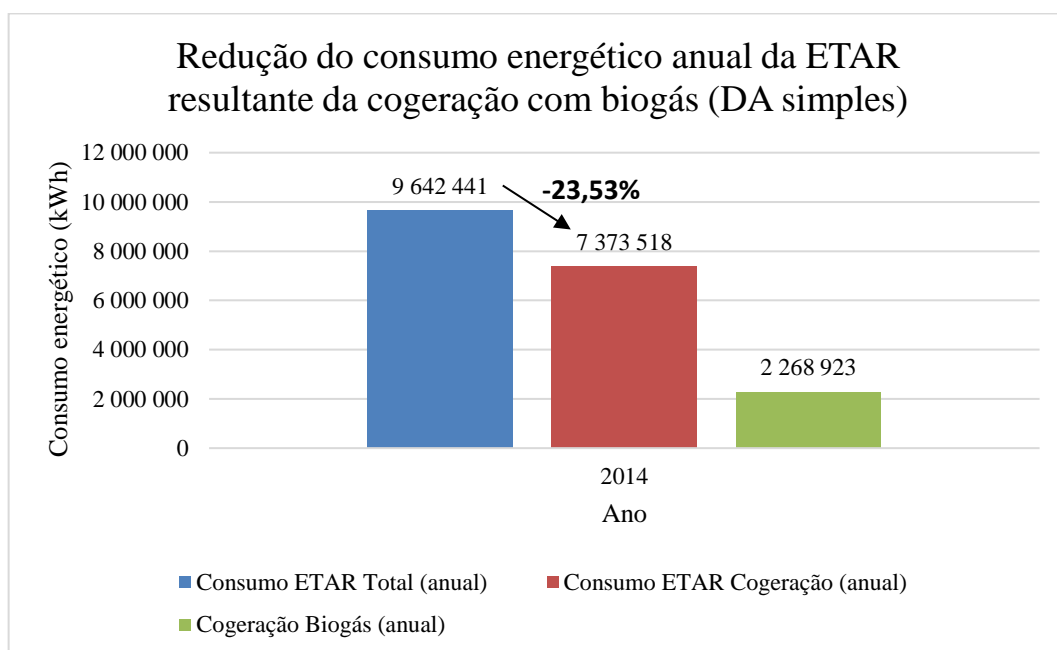


Figura 4.5 – Redução do consumo energético anual da ETAR proporcionada pela produção de energia em co-geração com biogás produzido no processo de digestão anaeróbia simples.

O gráfico ilustrado na Figura 4.4 verifica o impacto da produção de energia elétrica em co-geração para autoconsumo na redução mensal do consumo de energia elétrica, durante o ano de 2014. O gráfico ilustrado na Figura 4.5 permite apurar que a produção anual de energia elétrica em co-

geração resulta numa redução do consumo proveniente da RESP de 23,53%, correspondente ao valor de autossuficiência energética da ETAR.

O caudal afluyente apresentou um valor anual de 22.552.048 m³. O consumo energético específico da ETAR, sem produção de biogás em regime de co-geração para autoconsumo, apresentaria o valor de 0,428 kWh/m³. A energia produzida em co-geração com biogás resultou na redução do consumo específico para o valor de 0,327 kWh/m³.

O gráfico ilustrado na Figura 4.6 demonstra a poupança monetária mensal proporcionada pela produção de energia em co-geração ao longo do ano 2014. A produção interna de energia proporcionou uma poupança anual de 184.340,54 €.

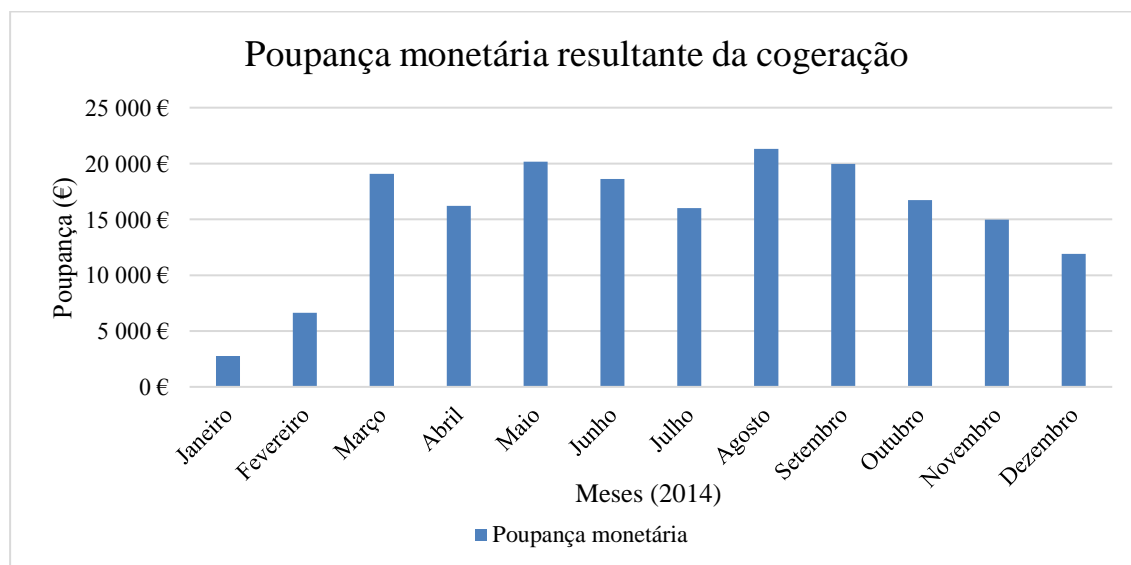


Figura 4.6 – Poupança monetária resultante da produção de energia em co-geração (DA simples).

4.4 Cenário co-digestão – resultados relativos à implementação de um regime de co-digestão anaeróbia na ETAR de Frielas

Como vem sendo dito, a presente dissertação apresenta a proposta de implementação de um regime de co-digestão anaeróbia na ETAR.

Os resultados seguidamente apresentados têm como base científica os valores recolhidos em ULDA, citados no ponto 4.1 da dissertação. O ensaio de co-digestão efetuado resultou na duplicação da produção de biogás e biometano constituinte relativamente à digestão anaeróbia simples (tradicional), com um desvio padrão associado à produção de biogás no valor de +/- 3,7% e um desvio padrão relativo à produção de biometano no valor de +/- 3,4%.

4.4.1 Benefício resultante da implementação de um regime de co-digestão, em comparação com o regime de digestão anaeróbia simples

Os gráficos ilustrados nas Figuras 4.7 e 4.8, efetuados com base na tabela em Anexo II, pretendem representar o benefício resultante da implementação de um regime de co-digestão anaeróbia, estimando o impacto do aumento de produção de biogás na redução do consumo energético e no aumento da poupança monetária anuais, relativamente ao cenário base (DA simples), partindo do princípio que os co-substratos a juntar ao substrato de alimentação são os mesmos que se utilizaram na atividade laboratorial desenvolvida.

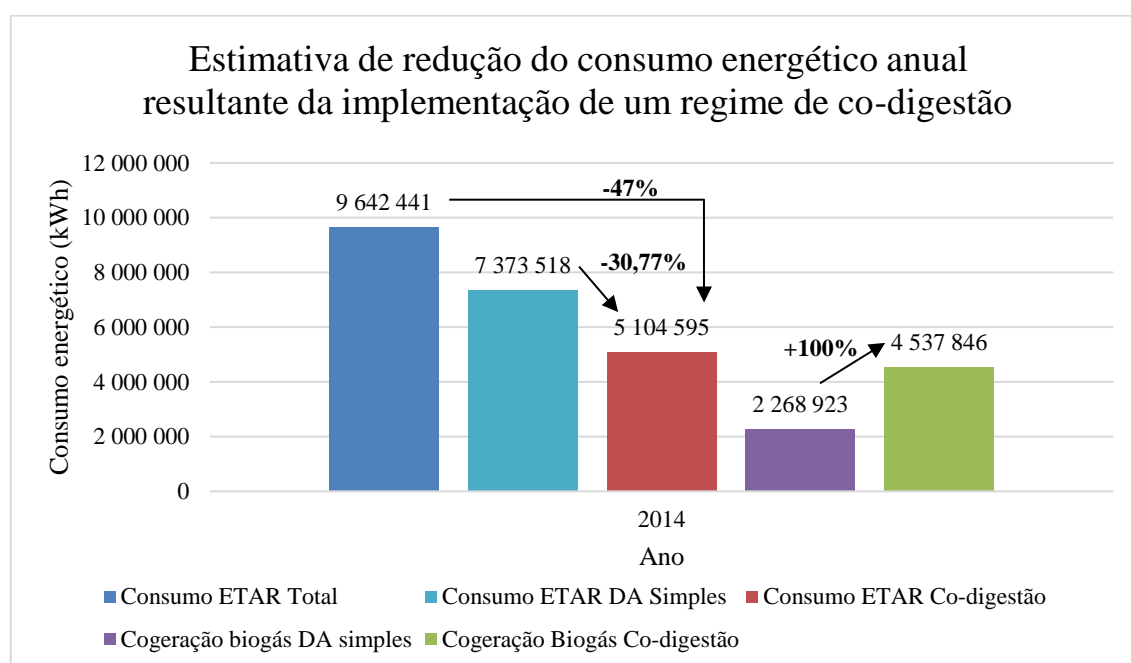


Figura 4.7 – Estimativa de redução do consumo energético anual da ETAR proporcionada pela implementação de um regime de co-digestão anaeróbia.

Analisando a Figura 4.7 verifica-se que a produção anual de energia proveniente de co-geração com biogás produzido em regime de co-digestão anaeróbia passaria a apresentar um valor estimado de 4.537.846 kWh. Assim sendo, a ETAR passaria a consumir anualmente um valor estimado de energia elétrica proveniente da RESP de 5.104.595 kWh.

Estimou-se um valor médio de redução do consumo energético anual de 30,77% (desvio padrão de 11,85%), relativamente ao cenário base de DA simples, traduzindo-se numa poupança energética anual de 2.268.923 kWh/ano. A ETAR passaria a apresentar um consumo específico de energia de 0,226 kWh/m³. A autossuficiência energética aumentou 23,5%, passando a representar 47% do consumo energético total da ETAR.

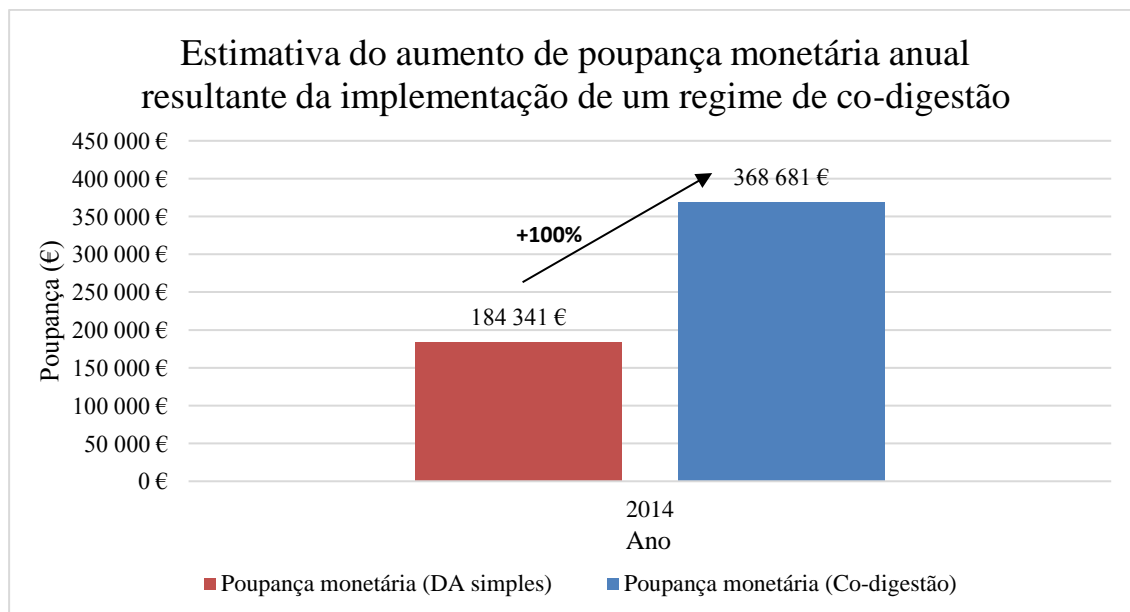


Figura 4.8 – Estimativa do aumento de poupança monetária anual resultante da implementação de um regime de co-digestão anaeróbia.

O gráfico da Figura 4.8 demonstra que o valor de poupança anual (€) naturalmente duplicou com a duplicação da produção interna de energia elétrica passando a apresentar o valor de 368.681 €. Isto significa um benefício em termos de poupança anual nos custos associados à compra de energia elétrica à RESP no valor de 184.341 €, relativamente ao cenário base de DA simples.

4.4.2 Diagrama de carga da ETAR em regime de co-digestão anaeróbia

Estimou-se um diagrama de carga diário médio representativo do perfil energético da ETAR com a implementação do regime de co-digestão anaeróbia.

O diagrama de carga foi elaborado com base no valor médio de redução do consumo energético da ETAR relativamente ao cenário base, calculado no ponto 4.4.1 da dissertação, que apresentou o valor de -30,77% (desvio padrão de 11,85%). Os valores calculados constam no Anexo III.

Importante referir que deverá ser realizada a gestão da percentagem dos co-substratos a juntar à alimentação do reator anaeróbia por forma a controlar o desvio padrão verificado. Em meses de maior precipitação e consequentemente maior caudal afluente, as lamas mistas de alimentação do reator encontram-se mais líquidas e com menor teor de matéria orgânica, deverá juntar-se maior percentagem de co-substrato de forma a enriquecer a alimentação em termos de composição de matéria orgânica biodegradável. O contrário também poderá ser feito, juntando menor quantidade de co-substrato em meses de menor caudal afluente.

Apresenta-se um gráfico na Figura 4.9 ilustrativo do diagrama de carga diário médio estimado para a ETAR em cenário de co-digestão. A média de potência anual estimada para o ano de 2014 com a implementação da prática de co-digestão anaeróbia é de aproximadamente 583 kW.

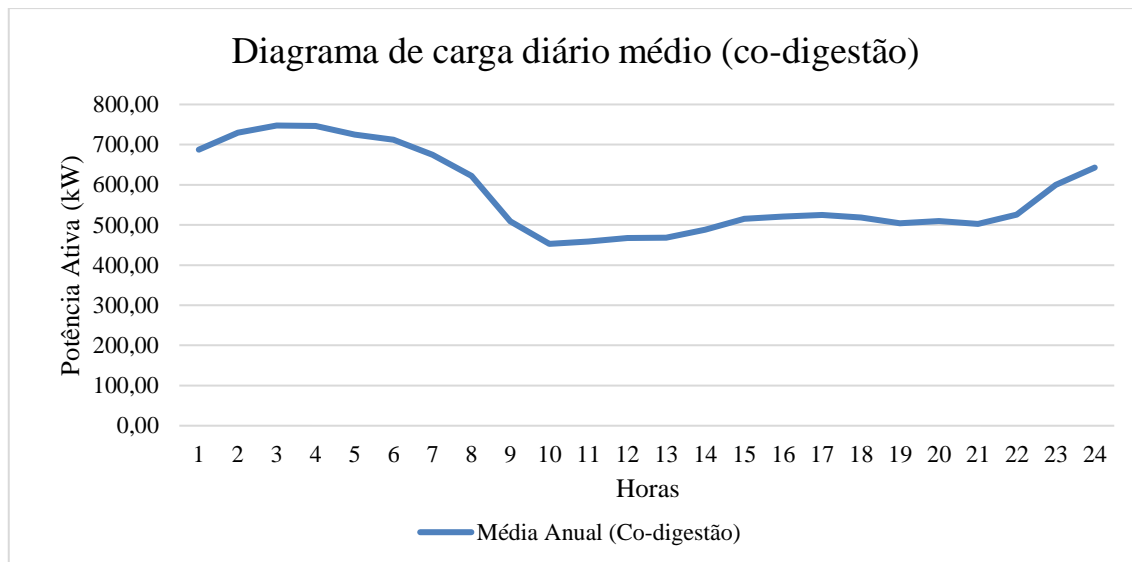


Figura 4.9 – Diagrama de carga diário médio da ETAR (cenário co-digestão).

A Figura 4.10 ilustra graficamente a comparação entre os diagramas de carga obtidos para o cenário base e para o cenário co-digestão. Verifica-se a redução do consumo energético proporcionada pela implementação de um regime de co-digestão anaeróbia, relativamente à DA simples.

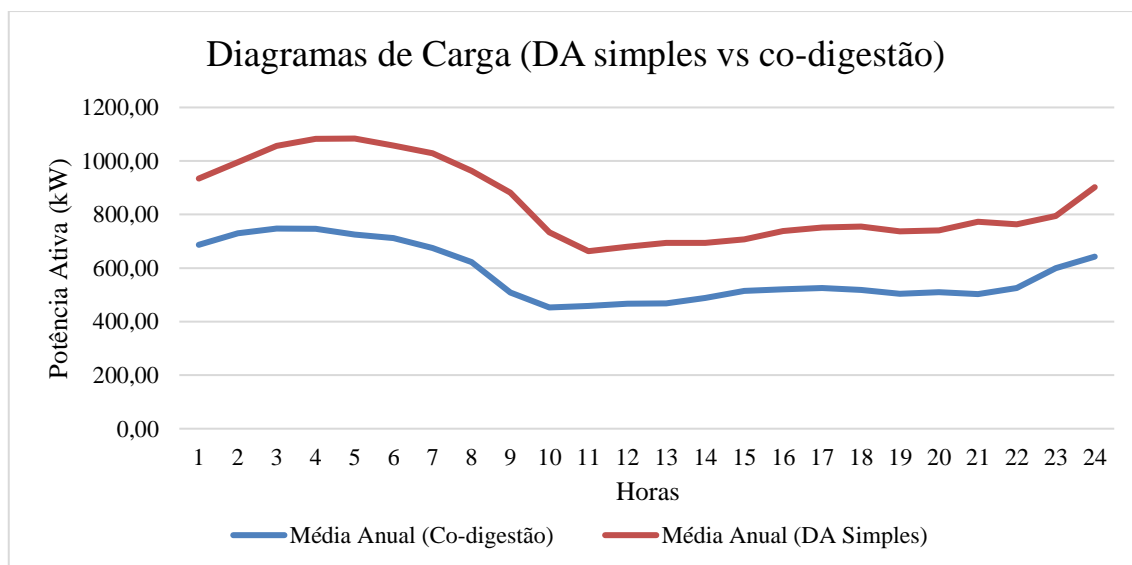


Figura 4.10 – Comparação entre diagramas de carga dos cenários de digestão anaeróbia simples e de co-digestão anaeróbia.

4.5 Dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico em regime de autoconsumo para cada um dos cenários energéticos

Apresentam-se os resultados relativos ao dimensionamento dos sistemas solares fotovoltaicos para os cenários energéticos desenvolvidos para a ETAR. Será efetuada uma análise comparativa dos aspetos técnicos e económicos da implementação de um sistema fotovoltaico no cenário base e no cenário co-digestão.

4.5.1 Número de módulos PV, potência de pico instalada e características do inversor para cada um dos cenários energéticos

O número de módulos fotovoltaicos e respetiva potência de pico instalada (DC) apurados em Excel, bem como as respetivas configurações da instalação e inversor selecionado apurados em PVsyst, apresentam-se seguidamente:

- Cenário base: Instalação de 2919 módulos fotovoltaicos, representando uma potência de pico instalada de 729,75 kWp. Selecionou-se o inversor SMA Sunny Central 630CP XT. A configuração da instalação apresenta 139 strings de 21 módulos.
- Cenário co-digestão: Instalação de 2002 módulos fotovoltaicos, representando uma potência de pico instalada de 500,5 kWp. Selecionou-se o inversor SMA Sunny Central 500CP XT. A configuração da instalação apresenta 154 strings de 13 módulos.

As características do inversor selecionado para o cenário base apresentam-se na Tabela 4.6. A Tabela 4.7 apresenta as características do inversor selecionado para o cenário co-digestão.

Tabela 4.6 – Características do inversor selecionado para o cenário base. Fonte: SMA.

Inversor SMA, Sunny Central 630CP XT	
Potência Máxima DC (kW)	713
Tensão Máxima DC (V)	1000
Corrente Máxima DC (A)	1350
Amplitude de Tensão, MPPT (V)	529-850
Potência AC máx./nominal (kW)	700/630
Corrente AC (A)	1283
Rendimento EU (%)	98,5

Tabela 4.7 – Características do inversor selecionado para o cenário base. Fonte: SMA.

Inversor SMA, Sunny Central 500CP XT	
Potência Máxima DC (kW)	560
Tensão Máxima DC (V)	1000
Corrente Máxima DC (A)	1250
Amplitude de Tensão, MPPT (V)	449 – 850
Potência AC máx./nominal (kW)	550/500
Corrente AC (A)	1176
Rendimento EU (%)	98,4

4.5.2 Produção fotovoltaica, autoconsumo e poupança anuais para os dois cenários

O objetivo dos dimensionamentos efetuados passou por direcionar toda a produção fotovoltaica para o autoconsumo da ETAR, evitando a venda de excedente à RESP.

Os gráficos representados nas Figuras 4.11 e 4.12, efetuados com base nas tabelas constantes nos Anexos IV, V, VI e VII, apresentam o consumo energético e produção fotovoltaica (Pac) na forma de potência ativa (kW) ao longo de 24 horas para o mês de Maio, que apresentou o menor valor unitário de potência ativa durante o ano de 2014.

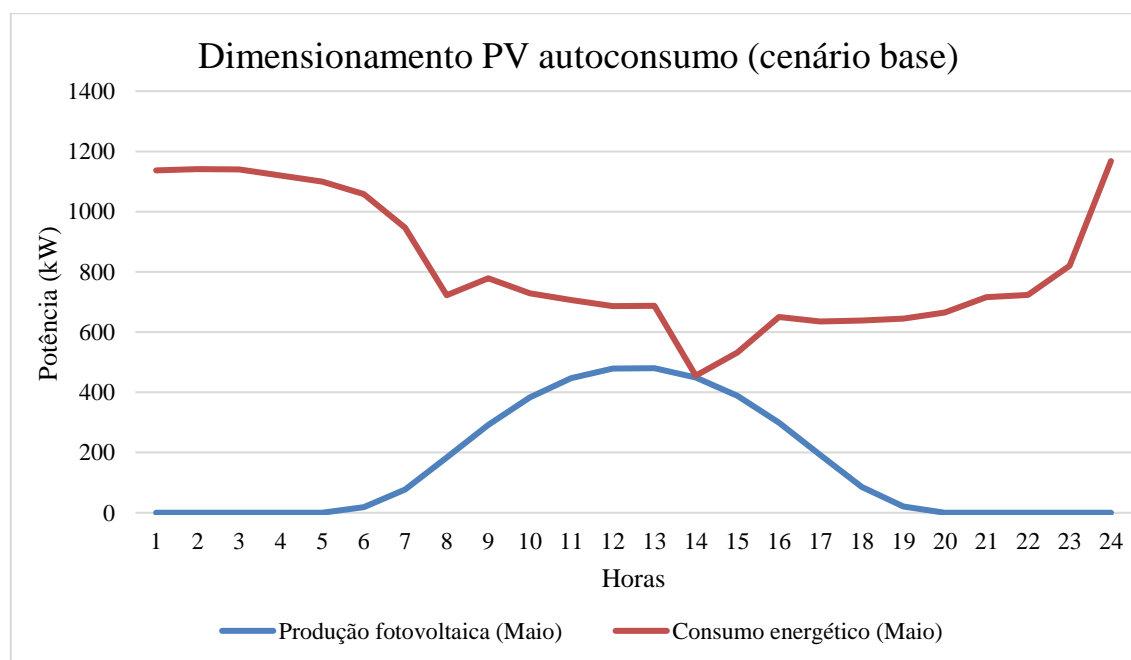


Figura 4.11 – Dimensionamento fotovoltaico direcionando toda a produção para autoconsumo (cenário base).

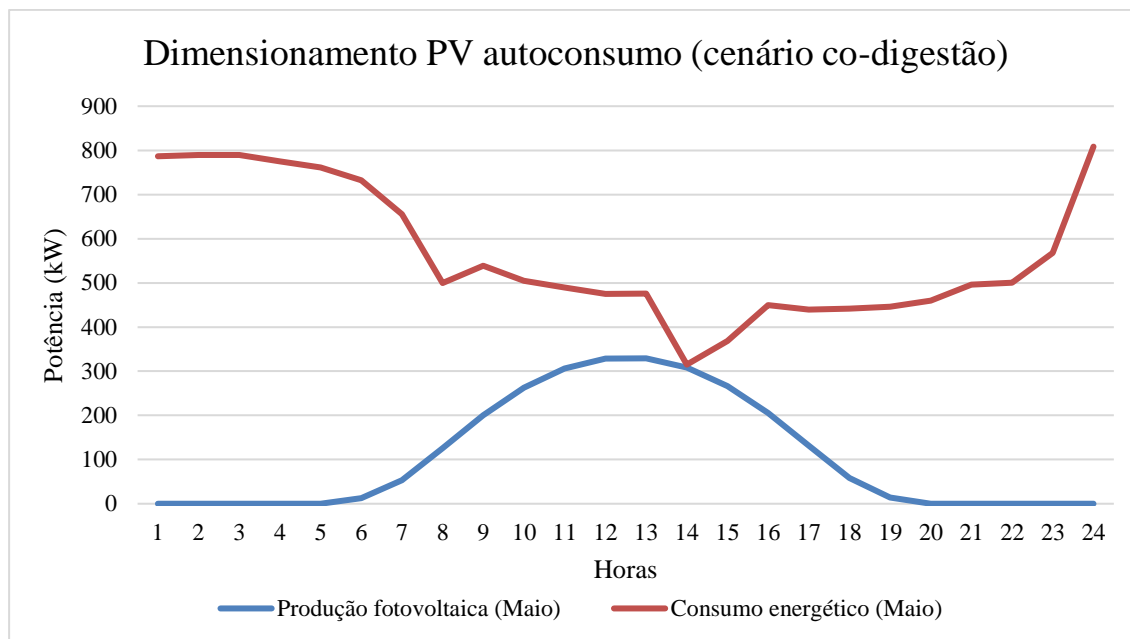


Figura 4.12 – Dimensionamento fotovoltaico direcionando toda a produção para autoconsumo (cenário co-digestão).

Os gráficos ilustrados nas Figuras 4.11 e 4.12 comprovam a intenção de direcionar toda a produção fotovoltaica para o autoconsumo da ETAR, verificando-se a linha de produção fotovoltaica sempre inferior à linha de consumo energético no mês que apresenta o valor mais reduzido de potência ativa (kW).

Importante referir que o dimensionamento efetuado não garante que toda a produção fotovoltaica seja de facto autoconsumida. Para que tal aconteça recomenda-se a gestão do consumo energético diário da ETAR, deslocalizando uma fração da potência em horas de vazio e super vazio para as horas de produção fotovoltaica, evitando a venda de excedente à RESP.

A Tabela 4.8 apresenta os valores de consumo energético, produção fotovoltaica, autoconsumo, C_{upac} e poupança ($R_{a,poup}$) anuais para os dois cenários energéticos. São conjuntamente apresentadas as percentagens de autoconsumo e autossuficiência energética.

Tabela 4.8 – Parâmetros mais importantes referentes ao sistema solar fotovoltaico dimensionado para cada um dos cenários energéticos em estudo.

Parâmetros (2014)	Cenário Base	Cenário Co-digestão
Produção fotovoltaica anual (Excel) (kWh)	1.174.086	804.169
Produção fotovoltaica anual (PVsyst) (kWh)	1.250.062	850.698
Autoconsumo anual (kWh)	1.174.086	804.169
$R_{a,poup}$ (€)	102.673	73.481
C_{upac} (€)	9.253	6.338
Autoconsumo (%)	100	100
Autossuficiência (%)	12,17	8,35
Área (m²)	4.749	3.257

O valor de produção fotovoltaica anual calculado em Excel foi sustentado pelo valor calculado em PVsyst, verificando-se uma satisfatória proximidade entre os valores.

Os valores calculados em Excel revelam-se mais conservadores, mas a diferença pouco significativa relativamente aos valores devolvidos pelo software PVsyst (aproximadamente 75.000 kWh/ano para o cenário base e 50.000 kWh/ano para o cenário co-digestão) não incita qualquer ação relativa aos métodos de cálculo efetuados.

Verifica-se que a produção fotovoltaica anual é igual ao autoconsumo anual nos dois cenários, representando 100% da produção direcionada para o autoconsumo da ETAR, como objetivado.

Como seria de esperar, a redução do consumo de energia elétrica da ETAR de aproximadamente 30% no cenário de co-digestão reduz de igual forma o número de painéis solares fotovoltaicos a instalar no dimensionamento do sistema e parâmetros inerentes.

Importante relembrar que os valores apresentados foram otimizados pela ferramenta “Solver” do Excel, requisitando o máximo de taxa interna de rentabilidade do investimento com a condicionante de que o autoconsumo do sistema seja de 100%.

4.6 Mapas de exploração financeira e autossuficiência energética gerada na implementação dos projetos associados aos cenários energéticos desenvolvidos para a ETAR

O objetivo passou por realizar uma apreciação do projeto proposto, que pressupõe a implementação integrada de um regime de co-digestão anaeróbia e de um sistema fotovoltaico, comparando esta solução à implementação singular de um sistema fotovoltaico no cenário energético da ETAR em 2014 (cenário base), semelhante ao verificado atualmente.

Os cenários energéticos elaborados entendem os seguintes projetos de implementação:

- Cenário Base: Projeto de implementação de um sistema solar fotovoltaico em regime de autoconsumo.
- Cenário Co-digestão: Projeto de implementação conjunta de um regime de co-digestão anaeróbia e de um sistema solar fotovoltaico em regime de autoconsumo.

O tempo de vida considerado para os painéis fotovoltaicos foi de 25 anos e o custo por kWp instalado representativo do custo do investimento inicial a realizar para o sistema fotovoltaico (painéis solares, suportes, inversor, etc) foi estabelecido no valor de 1300 €/kWp.

Para o inversor o tempo de vida considerado foi de 15 anos, sendo que no 16º ano é simulada a compra de novo inversor, com um custo de aproximadamente 92.000 € para o selecionado no cenário base e de aproximadamente 75.000 € para o selecionado no cenário co-digestão (transporte não incluído).

Como referido no capítulo de material e métodos, o mapa de exploração desenvolvido para o cenário de co-digestão inclui os parâmetros inerentes à implementação de um regime de co-digestão anaeróbia na ETAR:

- Investimento inicial: 524.000,00 €.
- Receita anual proveniente da poupança ($R_{a,poup}$): 184.340,54 € no 1º ano, contabilizando perda de rendimento do sistema de 0,4%/ano e aumento da tarifa para a energia elétrica de 2%/ano durante os 25 anos de vida do projeto.
- Autossuficiência: 23,5% no 1º ano, contabilizando perda de rendimento do sistema de 0,4%/ano durante os 25 anos de vida do projeto.

O gráfico ilustrado na Figura 4.13 apresenta o cash-flow acumulado calculado no mapa de exploração financeira referente à instalação de um sistema solar fotovoltaico no cenário energético base da ETAR. Por sua vez, o gráfico ilustrado na Figura 4.14 demonstra a autossuficiência gerada durante o tempo de vida do sistema solar fotovoltaico dimensionado para o cenário base, assumindo a perda anual de rendimento do sistema no valor de 0,4%/ano.

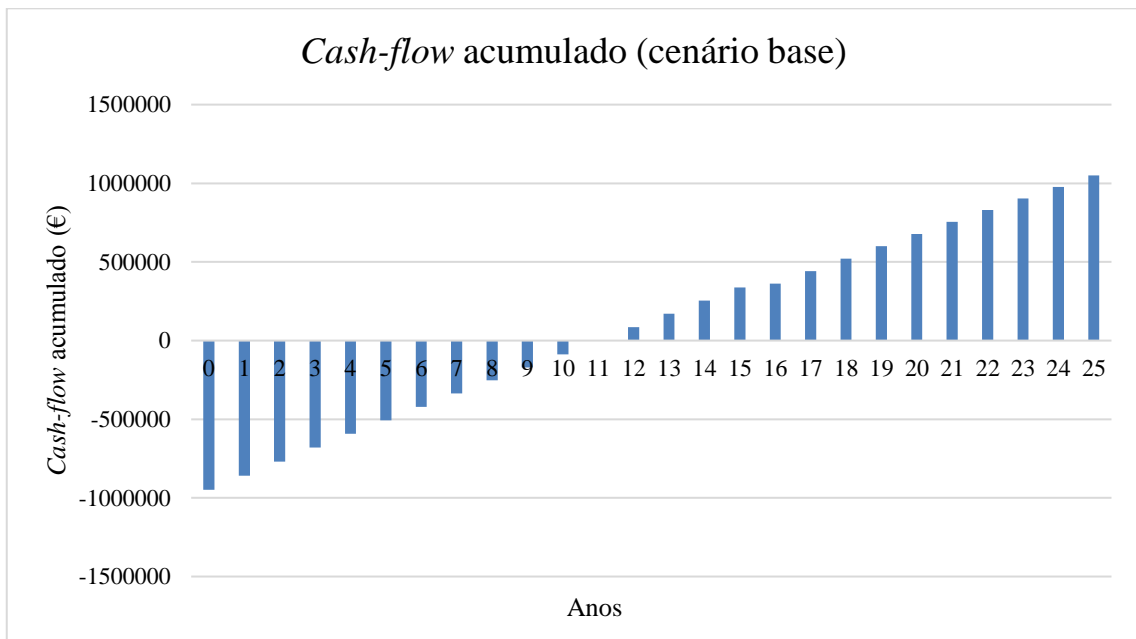


Figura 4.13 – Cash-flow acumulado (cenário base).

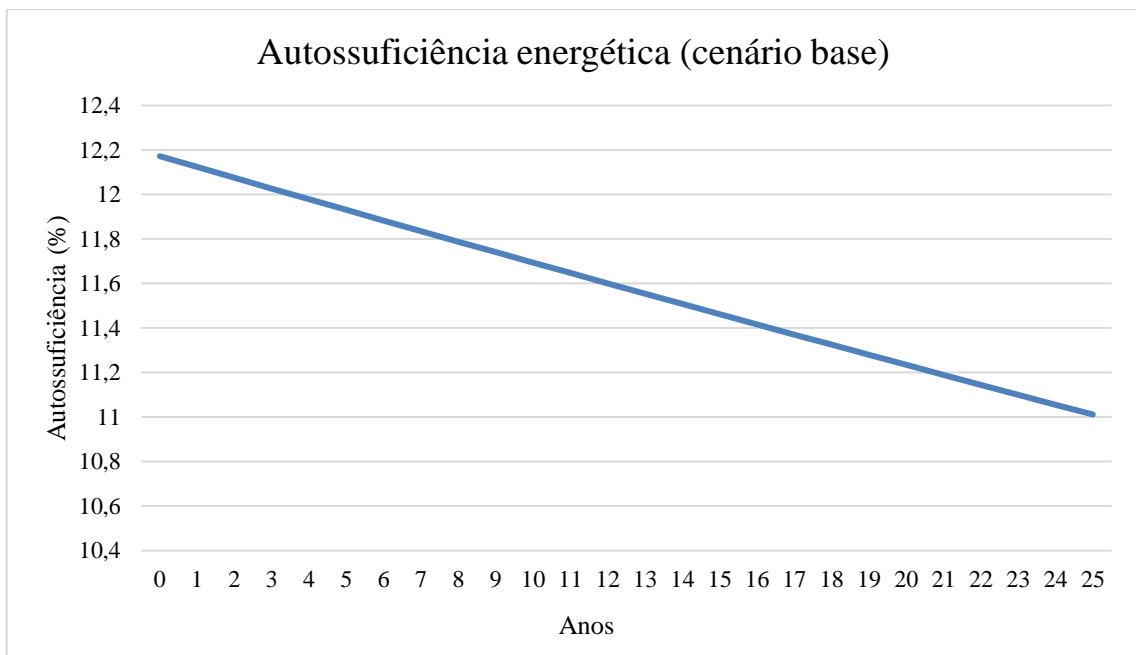


Figura 4.14 – Autossuficiência energética gerada no tempo de vida do sistema solar fotovoltaico em regime de autoconsumo no cenário base.

Nas Figuras 4.15 e 4.16 constam os gráficos demonstrativos do cash-flow acumulado e da autossuficiência energética, respetivamente, associados à exploração do projeto de implementação conjunta/integrada de um regime de co-digestão anaeróbia e de um sistema solar fotovoltaico na ETAR.

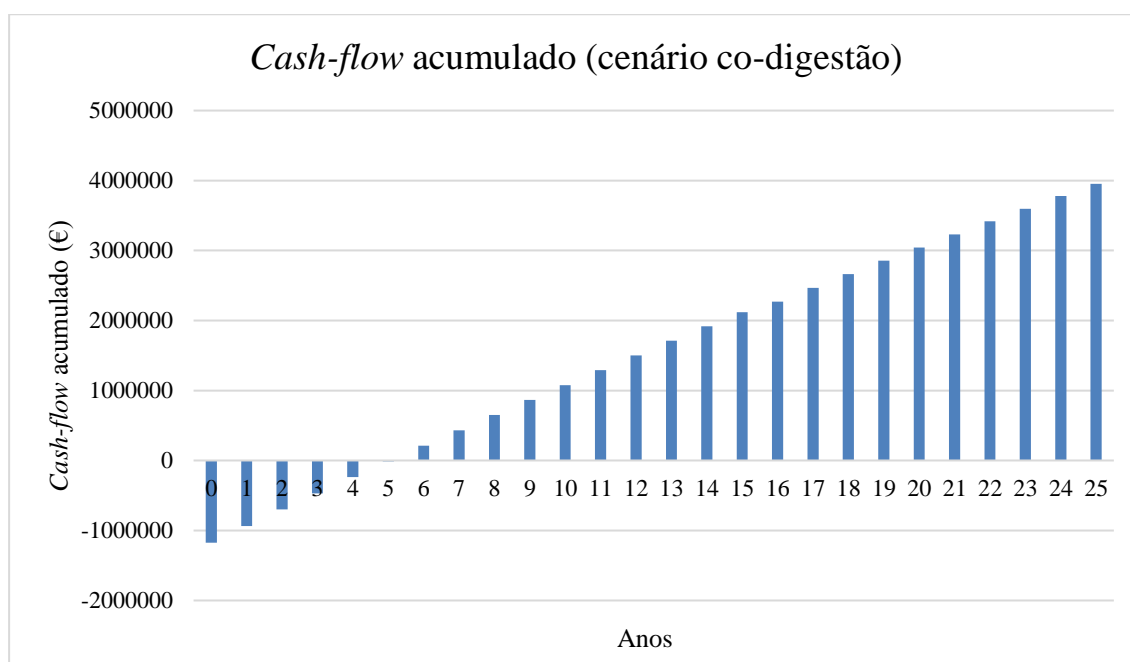


Figura 4.15 – Cash-flow acumulado (cenário co-digestão).

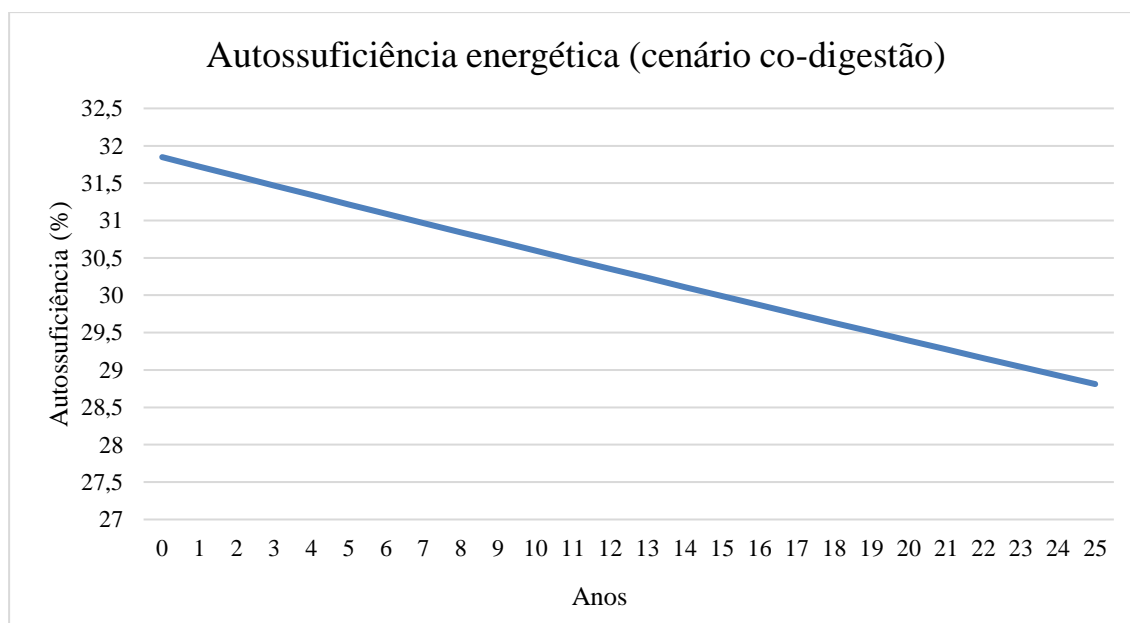


Figura 4.16 – Autossuficiência energética gerada no tempo de vida do projeto de implementação conjunta do regime de co-digestão anaeróbia e do sistema solar fotovoltaico (cenário co-digestão).

4.7 Análise comparativa do benefício resultante do projeto proposto

A Tabela 4.9 estabelece a comparação entre os indicadores financeiros inerentes aos mapas de exploração desenvolvidos para os dois cenários energéticos.

Tabela 4.9 – Indicadores financeiros associados aos mapas de exploração desenvolvidos para os cenários energéticos.

Indicadores	Cenário Base	Cenário Co-digestão
VAL (€)	1.050.106	3.954.961
PRI (ano)	12	6
TIR (%)	10,40%	22,39%

A análise comparativa dos projetos inerentes aos dois cenários energéticos constata a vantagem da implementação conjunta/integrada de um regime de co-digestão anaeróbia e de um sistema solar fotovoltaico em regime de autoconsumo, relativamente à solução de implementação do sistema solar fotovoltaico isoladamente.

Relativamente apenas aos sistemas solares fotovoltaicos, o dimensionado para o cenário co-digestão necessita de uma área de implementação consideravelmente menor (aproximadamente - 1500 m²), sendo vantajoso neste aspeto.

Verifica-se que o cenário co-digestão representa um investimento inicial superior, com uma diferença de 225.325,00 €, mas os indicadores financeiros calculados são mais vantajosos. O VAL foi calculado em 3.954.961 €, apresentando uma diferença positiva de 2.904.855 € relativamente ao cenário base, com um PRI de 6 anos (metade do tempo verificado no cenário base).

Salienta-se a TIR associada à exploração do investimento proposto, que apresenta um valor de 22,39%, comparativamente aos 10,4% verificados na exploração do investimento a realizar na implementação isolada de um sistema solar fotovoltaico para a ETAR.

Destaca-se o aumento da autossuficiência energética da ETAR proporcionado pela implementação integrada das tecnologias propostas, cuja produção energética destinada ao autoconsumo representará entre 31,9% e 28,8% do consumo energético total da ETAR, como demonstrado na Figura 4.16, significando um valor médio de 30,4% de autossuficiência energética durante o tempo de vida do projeto.

O aumento de produção de energia associado ao projeto proposto resulta numa poupança energética de 3.073.092 kWh no seu primeiro ano de vida, que reagirá proporcionalmente ao decréscimo de autossuficiência ao longo do tempo de vida do projeto.

Neste sentido, considerando o valor de autossuficiência energética atual da ETAR inerente à prática de digestão anaeróbia simples (23,5%) juntamente com o proporcionando pela implementação conjunta das medidas tecnológicas propostas, a ETAR passaria a apresentar uma autossuficiência energética entre 55,4% e 50,1% durante o tempo de vida do projeto, sendo correto afirmar um valor médio de aproximadamente 53%. Tal significa uma poupança energética média de 5.342.015 kWh/ano.

Capítulo 5 Considerações finais e trabalho futuro

5.1 Considerações Finais

A dissertação apresentou como principal objetivo o aumento da autossuficiência energética de uma ETAR, propondo a implementação de duas tecnologias de energias renováveis: co-digestão anaeróbia e sistema solar fotovoltaico em regime de autoconsumo.

Os resultados obtidos simulando a implementação das medidas tecnológicas propostas na ETAR de Frielas revelaram-se muito positivos. A produção de energia elétrica adicional direcionada para o autoconsumo resultou no aumento de 31,9% de autossuficiência da ETAR para o primeiro ano de vida do projeto, significando uma poupança de energia de aproximadamente 3.073.092 kWh/ano. É esperado que estes valores decresçam em função da perda de rendimento dos sistemas (0,4%/ano).

Assim, a ETAR passaria a apresentar uma autossuficiência energética média de aproximadamente 53%, considerando o tempo de vida do projeto fixado em 25 anos. O que significa que mais de metade da energia elétrica consumida na ETAR passaria a ser produzida internamente.

Os indicadores financeiros inerentes à exploração do investimento a realizar são muito interessantes, destacando a TIR de 22,34% para um tempo de retorno do investimento no 6º ano de vida do projeto, com o VAL calculado em 3.914.368 €.

Em termos práticos a implementação integrada das duas tecnologias procede primeiramente à implementação de um regime de co-digestão anaeróbia, entendendo um período de adaptação e normalização das práticas, seguida de um sistema solar fotovoltaico em regime de autoconsumo. A referida ordem de implementação é técnica e economicamente mais vantajosa.

Fundamentando, o dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico pelo método utilizado no presente estudo, que entende o máximo de produção fotovoltaica totalmente direcionada para autoconsumo, seria comprometido com a posterior implementação de um regime de co-digestão, que viria reduzir o perfil de consumo energético, resultando num excedente de produção que teria de ser vendido à RESP.

Recomenda-se a gestão do consumo energético diário da ETAR, deslocalizando uma fração da potência em horas de vazio e super vazio para as horas de produção fotovoltaica, evitando a venda de excedente à RESP.

O estudo desenvolvido pretendeu dar um contributo para a melhoria da autossustentabilidade da ETAR, reforçando o seu potencial para, no futuro, se tornar produtor excedentário de energia renovável. Importante referir que só através de métodos que visem melhorar o rendimento de processos de valorização dos resíduos de ETAR, como o processo de digestão anaeróbia, se tornará possível alcançar tais metas.

O contributo prestado vai de encontro com os objetivos e metas estipulados nos acordos internacionais, traduzidos em legislação nacional, que visam o aumento da produção energética proveniente de fontes renováveis e a redução de consumos inerente ao aumento de eficiência dos sistemas, com vista à redução das emissões de GEE.

5.2 Proposta de trabalho futuro

De forma a dar continuidade ao trabalho desenvolvido na presente dissertação, sugere-se o estudo de implementação de um sistema de purificação do biogás produzido na ETAR com vista à sua conversão em biometano.

Deverão considerar-se os cenários de compressão para liquefação do biometano, promovendo a sua utilização como combustível automóvel, e compressão para injeção do biometano na rede nacional de gás natural, com vista à comparação de benefícios e dificuldades resultantes da exploração dos projetos.

Refira-se que a ETAR de Frielas tem proximidade a uma conduta gás natural, cenário que viabiliza o estudo supracitado. No entanto, a legislação nacional ainda não contém informação decisória sobre o regime remuneratório de injeção de biometano na rede de gás natural, apesar dos acordos internacionais relativos ao clima e à energia incluírem esta prática nos objetivos definidos.

Inerente à implementação do sistema suprarreferido, considera-se importante o estudo de integração conjunta de um sistema solar térmico com vista ao aquecimento do reator anaeróbio da ETAR, identificado como sendo o principal ponto de consumo energético associado à tecnologia de digestão anaeróbia, apresentando uma necessidade energética considerável.

Este sistema, em conjunto com o aproveitamento da energia térmica resultante do funcionamento dos sistemas de compressão de biometano, poderá evitar a utilização de biogás em caldeira para aquecimento dos reatores anaeróbios, resultando no aproveitamento total deste recurso energético.

Bibliografia

- Abdelgadir, et al. (2014). Characteristics, Process Parameters, and Inner Components of Anaerobic Bioreactors. *BioMed Research International*.
- Águas do Algarve, SA. (2015). *Produção de energia verde*. Obtido em 27 de 7 de 2016, de www.aguasdoalgarve.pt:
http://www.aguasdoalgarve.pt/uploads/Folheto_Fotovoltaico_2.pdf
- Alepo, et al. (2016). Effect of Hydraulic Retention Time on Anaerobic Digestion of Xiao Jiahe Municipal Sludge. *International Journal of Waste Resources*.
- Alves, N. F. (2013). *Projecto de Pré-dimensionamento de uma ETAR em Luanda - Angola. Tese de Mestrado*. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Armstrong, S. (2010). *A Thermal Model for Photovoltaic Panels Under Varying Atmospheric Conditions*. Applied Thermal Engineering.
- Barber, W. (2016). Thermal hydrolysis for sewage treatment: A critical review. *Elsevier. Water Research* 104., 53-71.
- Bodík, I., & Kubaská, M. (2013). Energy and Sustainability of Operation of a Wastewater Treatment Plant. Em *Environment Protection Engineering*, Vol. 39, No. 2 (pp. 16-24).
- Carvalho, A., Fragoso, R., Gominho, J., Saraiva, A., Costa, R., & Duarte, E. (2016). Water-energy nexus: Anaerobic co-digestion with elephant grass hydrolyzate. *Journal of Environmental Management*, 48-53.
- Carvalho, L. (2010). *Avaliação do Potencial de Produção de Biogás a partir de Biomassa Proveniente de Culturas Dedicadas e de Lamas de Etari. Tese de Mestrado*. Universidade de Lisboa. Instituto Superior de Agronomia.
- Castro, R. (2011). *Uma Introdução às Energias Renováveis: Eólica, Fotovoltaica e Mini-hídrica*. Instituto Superior Técnico.

- Chen, Cheng, & Creamer. (2007). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology* 99, 4044–4064.
- Conselho da União Europeia. (17 de 3 de 2015). *Quadro relativo ao clima e à energia para 2030*. Obtido em 21 de 8 de 2016, de consilium.europa.eu: <http://www.consilium.europa.eu/pt/policies/climate-change/2030-climate-and-energy-framework/>
- Costa, R. J. (2011). *Produção e Aplicação de Biogás. Tese de Mestrado*. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Instituto Politécnico de Coimbra.
- Coutada, J. (2015). *Produção Fotovoltaica em Autoconsumo e Pequena Produção: Caso de Estudo do ISEP. Tese de Mestrado*. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Crespo, E. J. (2013). *Digestão Anaeróbia de Resíduos Agroalimentares: Reutilização das Frações Líquidas e Sólidas (State-of-Art). Tese de Mestrado*. Universidade Nova de Lisboa. Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Decreto-lei n.º 153/2014 de 20 de outubro (Diário da República, 1.ª série - N.º 202).
- Dias, T. (2014). *Co-digestão como Solução para a Valorização Energética de Resíduos de Fruta e Legumes. Tese de Mestrado*. Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa.
- Dioha, Ikeme, Nafi'u, Soba, & Yusuf. (2013). Effect of Carbon to Nitrogen Ratio on Biogas Production. *International Research Journal of Natural Sciences*, Vol. 1 No. 3, pp.1-10.
- Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE). (2015). *Tarifas e Preços para a Energia Elétrica e Outros Serviços em 2016*. Obtido em 28 de 07 de 2016, de http://www.erse.pt/pt/electricidade/tarifaseprecos/2016/Documents/Tarifas%20e%20Pre%C3%A7os%202016_Final.pdf
- Ferreira, R. J. (2008). *Carro a Energia Solar. Tese de Mestrado*. Universidade do Porto. Faculdade de Engenharia.
- Fonoll, X., Astals, S., Dosta, J., & Mata-Alvarez, J. (2015). Anaerobic Co-Digestion of Sewage Sludge and Fruit Wastes: Evaluation of the Transitory States when the Co-Substrate is Changed. *Elsevier. Chemical Engineering Journal* 262., 1268-1274.
- Fraunhofer - Institute for Solar Energy Systems (ISE); PSE AG. (2016). *Photovoltaics Report*. Obtido em 3 de 9 de 2016, de <https://www.ise.fraunhofer.de/de/downloads/pdf-files/aktuelles/photovoltaics-report-in-englischer-sprache.pdf>
- Freitas, S. S. (2008). *Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos. Tese de Mestrado*. Escola Superior de Tecnologia e Gestão. Instituto Politécnico de Bragança.
- GREENPRO. (2004). *Energia Fotovoltaica - Manual Sobre Tecnologias, Projecto e Instalação*.

- Guimarães, B. (2016). *Análise da Viabilidade Económica da Instalação de um Sistema de Autoconsumo Fotovoltaico numa Habitação. Tese de Mestrado*. Universidade do Porto. Faculdade de Engenharia.
- Hopkowicz, M. (2000). Em *Energy Management at WWTP with Biogas Utilisation* (pp. 43-48). Poland: Cracow University of Technology, Institute of Thermal Engineering and Air Protection.
- Internacional Energy Agency. (2015). *Trends 2015 in Photovoltaic Applications. Photovoltaic Power Systems Programme (PVPS)*.
- Jesus, C. P. (2011). *Impacto Macroeconómico do Sector das Energias Renováveis em Portugal. Tese de Mestrado*. Universidade Católica Portuguesa.
- Lavado, A. L. (2009). *Os actuais desafios da energia. Implementação e utilização das energias renováveis. Tese de Mestrado*. Universidade de Lisboa. Faculdade de Ciências.
- Leonardo, S. M. (2012). *Caracterização do Digestor Anaeróbio de Lamas Biológicas da ETAR do Choupal, em Coimbra. Tese de Mestrado*. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.
- Mara, & Horan. (2003). *Handbook of Water and Wastewater Microbiology, 1st Edition*. Academic Press.
- Mayer, J., Philipps, S., Hussein, N., Schlegl, T., & Senkpiel, C. (2015). *Current and Future Cost of Photovoltaics*. Fraunhofer - Institute for Solar Energy Systems (ISE). Agora Energiewende.
- Menendez, M., & Black, P. E. (2010). How we use energy at wastewater plants and how we can use less. *NC AWWA-WEA 90th Annual Conference*.
- Monte, M. M. (2010). *Contributo para o Estudo da Valorização Energética de Biogás em Estações de Tratamento de Águas Residuais. Tese de Mestrado*. Universidade Nova de Lisboa. Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Mulat, D. G. (2015). *Improved Understanding of Anaerobic Digester Processes by Stable Isotope Techniques. Tese de Doutoramento*. Aarhus University.
- Oliveira, S. A. (2014). *Ensaio Exploratório de Otimização do Tratamento Primário da Etar de Beírolas para Incrementar a Eficiência Energética. Aplicação de Moringa Oleifera no Processo de Coagulação-floculação. Tese de Mestrado*. Universidade de Lisboa. Instituto Superior de Agronomia.
- Omolola, A. M. (2007). *Anaerobic Digestion of Ethanol Distillery Waste-Stillage for Biogas Production. Tese de Mestrado*. Institutionen Ingenjörshögskolan. Högskolan i Borås.
- Pinto, N. F. (2015). *Contributo para a Minimização do Consumo Energético numa Etar: Estudo do Efeito de Diferentes Proporções de Lamas Primárias e Ativadas no Processo de*

Digestão Anaeróbia. O Estudo de Caso da ETAR do Seixal. Tese de Mestrado.
Universidade de Lisboa. Instituto Superior de Agronomia.

Portarias n.º 14/2015 e nº 15/2015 de 23 de Janeiro (Diário da República, 1ª série - nº 16 - 23 de janeiro de 2015).

Quaschnig, V. (2016). *Understanding Renewable Energy Systems*. Routledge.

Silva, M. A. (2012). *Factores de Sustentabilidade em Energias. Tese de Mestrado*. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

Silveira, G. (2009). *Estudo de Co-Digestão Anaeróbia de Lamas Domésticas com o Efluente da Indústria da Fermentação da Levedura do Pão da Empresa Mauri Fermentos. Tese de Mestrado*. Universidade Nova de Lisboa. Faculdade de Ciências e Tecnologia.

Szmidt, et al. (2013). Chapter 5 - Producing and Using Biogas. Em *The Pratical Guide to AD* (pp. 59-80). ADBA.

Taylor, M., Ralon, P., & Ilas, A. (2016). *THE POWER TO CHANGE: SOLAR AND WIND COST REDUCTION POTENTIAL TO 2025*. IRENA.

Tchobanoglous, G., Stensel, H., & Tsuchihashi, R. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse (Fourth Edition)*. Metcalf & Eddy, Inc.

Twidell, J., & Weir, T. (2015). *Renewable Energy Resources (Third Edition)*. Routledge.

United States Environmental Protection Agency (EPA). (2010). *Food Waste Biogas Economic Model*. Obtido em 13 de 9 de 2016, de archive.epa.gov:
<https://archive.epa.gov/region9/organics/web/xls/epa-food-waste-biogas-economic-model.xls+&cd=1&hl=pt-PT&ct=clnk&gl=pt>

Wirth, H. (2016). *Recent Facts about Photovoltaics in Germany*. Fraunhofer ISE.

Anexos

Anexo I

Diagrama de carga da ETAR (2014) – Cenário Base													
Hora	Janeiro (kW)	Fevereiro (kW)	Março (kW)	Abril (kW)	Maió (kW)	Junho (kW)	Julho (kW)	Agosto (kW)	Setembro (kW)	Outubro (kW)	Novembro (kW)	Dezembro (kW)	Média (kW)
1	1104,50	932,00	1143,75	799,75	1136,75	1138,00	1213,00	865,75	1009,25	559,00	1020,75	1092,50	1001,25
2	1100,50	959,50	1169,50	1061,25	1141,00	1174,25	1187,75	1121,75	1019,00	733,50	1018,50	1111,00	1066,46
3	1064,50	1059,75	1146,25	1201,25	1140,25	1188,00	1090,25	1123,00	983,50	1053,50	973,00	1080,75	1092,00
4	1083,75	1023,75	1067,75	1155,50	1119,50	1334,25	1119,00	1083,50	996,25	1019,75	923,25	1109,50	1086,31
5	1120,75	1028,50	1054,75	1106,75	1100,00	1156,50	1093,50	1071,00	1007,25	951,50	913,25	1105,25	1059,08
6	1075,50	1098,25	1040,75	1085,75	1057,75	1108,00	1065,25	1045,75	972,75	967,00	914,50	1058,00	1040,77
7	1070,25	1105,25	1038,25	1065,25	947,00	697,25	1069,00	1026,50	853,00	962,75	919,50	1087,75	986,81
8	1059,50	975,00	1051,75	1028,25	721,75	673,50	941,25	772,75	874,75	758,50	916,75	1112,75	907,21
9	949,75	825,75	981,50	655,75	778,75	692,75	759,75	575,50	938,00	532,50	738,00	769,75	766,48
10	844,50	685,75	742,50	679,75	729,00	688,50	798,25	573,25	552,50	570,25	535,50	719,75	676,63
11	774,50	831,50	708,50	685,25	706,75	691,00	779,25	583,00	535,00	619,00	575,75	727,75	684,77
12	900,50	831,75	693,75	702,50	686,25	677,75	784,75	600,25	539,50	614,50	553,25	768,00	696,06
13	892,25	797,25	702,00	713,25	686,75	677,75	792,50	582,00	545,75	598,50	565,25	799,00	696,02
14	960,25	719,75	671,00	745,25	455,00	716,75	837,00	634,25	808,25	602,00	583,25	781,25	709,50
15	870,00	777,50	721,50	796,25	532,00	756,25	831,75	651,00	982,75	661,75	570,75	761,00	742,71
16	862,00	764,50	739,25	793,25	649,50	731,00	810,00	655,00	1001,50	689,50	560,50	798,00	754,50
17	843,25	913,25	652,75	793,75	635,25	756,25	818,25	643,75	947,75	637,75	536,50	827,50	750,50
18	893,00	991,50	635,00	817,50	638,50	763,00	808,25	628,50	708,00	616,75	544,25	733,75	731,50
19	897,00	1123,50	631,75	795,50	644,75	809,00	790,00	643,00	460,50	654,75	546,50	796,25	732,71
20	822,50	1142,25	654,75	799,25	664,50	798,50	830,00	648,25	514,75	694,50	535,50	808,00	742,73
21	813,50	1156,25	677,75	780,25	716,00	781,00	843,75	675,25	521,00	680,00	535,00	670,25	737,50
22	848,75	1117,75	673,25	747,25	723,00	793,50	858,50	908,75	527,25	647,50	681,75	683,75	767,58
23	868,00	993,25	686,75	741,25	820,25	869,25	847,00	1082,00	1009,00	680,25	1020,00	907,75	877,06
24	964,50	990,25	719,00	751,75	1167,75	1168,25	1208,75	671,00	710,75	627,25	749,25	1109,00	903,13
Média	945,15	951,82	833,5	854,23	816,58	868,34	924,03	786,03	792,42	713,84	726,27	892,43	842,05

Anexo II

2014	Caudal Afluente ETAR (m³)	Consumo ETAR (Total) (kWh)	Consumo ETAR (DA simples) (kWh)	Consumo ETAR (Co-digestão) (kWh)	Co-geração Biogás (DA simples) (kWh)	Co-geração Biogás (Co-digestão) (kWh)	Poupança (DA simples) (€)	Poupança (Co-digestão) (€)	Redução Consumo (DA simples) (%)	Redução Consumo (Co- digestão) (%)	Redução Consumo (DA simples > Co- digestão) (%)
Janeiro	2.605.578	736.154	702.107	668.064	34.045	68.090	2.766	5.532	4,62	9,25	4,85
Fevereiro	2.472.325	721.830	640.096	558.362	81.734	163.468	6.641	13.281	11,32	22,65	12,77
Março	2.073.756	854.451	619.636	384.821	234.815	469.630	19.078	38.155	27,48	54,96	37,9
Abril	2.069.537	816.927	617.537	418.147	199.390	398.780	16.200	32.399	24,41	48,81	32,29
Maio	1.635.260	856.607	608.438	360.269	248.169	496.338	20.163	40.325	28,97	57,94	40,79
Junho	1.482.020	854.361	625.215	396.069	229.146	458.292	18.617	37.234	26,82	53,64	36,65
Julho	1.402.800	883.198	686.274	489.350	196.924	393.848	15.999	31.999	22,30	44,59	28,69
Agosto	1.250.400	848.885	586.473	324.061	262.412	524.824	21.320	42.640	30,91	61,83	44,74
Setembro	1.590.640	815.987	570.286	324.585	245.701	491.402	19.962	39.924	30,11	60,22	43,08
Outubro	1.739.820	737.244	531.559	325.874	205.685	411.370	16.711	33.422	27,90	55,80	38,69
Novembro	2.232.520	707.698	523.292	338.886	184.406	368.812	14.982	29.964	26,06	52,11	35,24
Dezembro	1.997.392	809.102	662.606	516.110	146.496	292.992	11.902	23.804	18,11	36,21	22,11
Total	22.552.048	9.642.441	7.373.518	5.104.595	2.268.923	4.537.846	184.341	368.681	23,53 (média)	47,06 (média)	30,77 (média)

Anexo III

Diagrama de carga da ETAR (2014) – Cenário Co-digestão													
Hora	Janeiro (kW)	Fevereiro (kW)	Março (kW)	Abril (kW)	Maió (kW)	Junho (kW)	Julho (kW)	Agosto (kW)	Setembro (kW)	Outubro (kW)	Novembro (kW)	Dezembro (kW)	Média (kW)
1	764,63	645,21	741,96	553,66	786,96	787,82	839,74	599,35	698,69	386,99	706,65	756,32	647,19
2	761,86	664,25	729,50	734,69	789,90	812,92	822,26	776,57	705,44	507,79	705,09	769,13	689,00
3	736,94	733,65	718,77	831,61	789,38	822,44	754,77	777,44	680,86	729,32	673,60	748,19	731,62
4	750,27	708,73	717,90	799,94	775,02	923,68	774,67	750,09	689,69	705,96	639,15	768,09	749,75
5	775,88	712,02	718,77	766,19	761,52	800,63	757,02	741,44	697,31	658,71	632,23	765,15	750,27
6	744,56	760,30	616,66	751,65	732,27	767,05	737,46	723,96	673,42	669,44	633,10	732,44	732,24
7	740,92	765,15	525,79	737,46	655,60	482,70	740,06	710,63	590,52	666,50	636,56	753,04	711,86
8	733,48	674,98	519,04	711,84	499,66	466,26	651,62	534,97	605,58	525,10	634,65	770,34	667,08
9	657,50	571,66	410,53	453,97	539,12	479,58	525,97	398,41	649,37	368,64	510,91	532,89	610,63
10	584,64	474,74	401,70	470,58	504,68	476,64	552,62	396,85	382,49	394,78	370,72	498,27	508,21
11	536,18	575,64	448,26	474,39	489,27	478,37	539,47	403,60	370,37	428,53	398,58	503,81	459,06
12	623,40	575,81	461,93	486,33	475,08	469,20	543,27	415,55	373,49	425,41	383,01	531,68	470,54
13	617,69	551,93	468,68	493,77	475,43	469,20	548,64	402,91	377,82	414,33	391,32	553,14	480,35
14	664,77	498,27	445,49	515,93	314,99	496,20	579,44	439,08	559,54	416,76	403,78	540,85	480,40
15	602,29	538,25	458,29	551,23	368,30	523,54	575,81	450,68	680,35	458,12	395,12	526,83	489,59
16	596,75	529,25	484,60	549,16	449,64	506,06	560,75	453,45	693,33	477,33	388,03	552,45	510,74
17	583,77	632,23	493,60	549,50	439,78	523,54	566,46	445,66	656,12	441,51	371,41	572,87	520,07
18	618,21	686,40	481,31	565,95	442,03	528,22	559,54	435,10	490,14	426,97	376,78	507,97	523,04
19	620,98	777,79	500,70	550,71	446,35	560,06	546,91	445,14	318,80	453,28	378,34	551,23	509,88
20	569,41	790,77	701,11	553,31	460,03	552,79	574,60	448,78	356,36	480,79	370,72	559,37	512,52
21	563,18	800,46	680,52	540,16	495,68	540,68	584,12	467,47	360,68	470,76	370,37	464,01	534,84
22	587,58	773,80	690,56	517,31	500,52	549,33	594,33	629,12	365,01	448,26	471,97	473,35	528,17
23	600,91	687,61	682,25	513,16	567,85	601,77	586,37	749,06	698,52	470,93	706,13	628,42	550,09
24	667,71	685,54	761,34	520,43	808,42	808,76	836,80	464,52	492,04	434,24	518,70	767,75	624,41
Média	654,31	658,94	577,47	591,37	565,31	601,14	633,11	538,56	542,93	489,10	497,61	611,46	582,98

Anexo IV

Autoconsumo fotovoltaico (janeiro a junho de 2014) – Cenário Base																		
Horas	Janeiro			Fevereiro			Março			Abril			Maio			Junho		
	Pac	Consumo	Autoconsumo	Pac	Consumo	Autoconsumo	Pac	Consumo	Autoconsumo	Pac	Consumo	Autoconsumo	Pac	Consumo	Autoconsumo	Pac	Consumo	Autoconsumo
1	0	1105	0	0	932	0	0	1072	0	0	800	0	0	1137	0	0	1138	0
2	0	1101	0	0	960	0	0	1054	0	0	1061	0	0	1141	0	0	1174	0
3	0	1065	0	0	1060	0	0	1038	0	0	1201	0	0	1140	0	0	1188	0
4	0	1084	0	0	1024	0	0	1037	0	0	1156	0	0	1120	0	0	1334	0
5	0	1121	0	0	1029	0	0	1038	0	0	1107	0	0	1100	0	0	1157	0
6	0	1076	0	0	1098	0	30	891	30	4	1086	4	18	1058	18	24	1108	24
7	11	1070	11	75	1105	75	152	760	152	64	1065	64	77	947	77	81	697	81
8	159	1060	159	219	975	219	273	750	273	173	1028	173	183	722	183	190	674	190
9	250	950	250	319	826	319	373	593	373	284	656	284	292	779	292	299	693	299
10	313	845	313	388	686	388	440	580	440	375	680	375	383	729	383	389	689	389
11	344	775	344	422	832	422	474	648	474	437	685	437	446	707	446	453	691	453
12	343	901	343	422	832	422	474	667	474	469	703	469	479	686	479	485	678	485
13	312	892	312	388	797	388	441	677	441	470	713	470	480	687	480	486	678	486
14	252	960	252	321	720	321	375	644	375	441	745	441	449	455	449	456	717	456
15	162	870	162	223	778	223	278	662	278	381	796	381	388	532	388	396	756	396
16	41	862	41	102	765	102	158	700	158	292	793	292	300	650	300	309	731	309
17	0	843	0	3	913	3	41	713	41	182	794	182	192	635	192	201	756	201
18	0	893	0	0	992	0	0	695	0	72	818	72	85	639	85	91	763	91
19	0	897	0	0	1124	0	0	723	0	7	796	7	20	645	20	24	809	24
20	0	823	0	0	1142	0	0	1013	0	0	799	0	0	665	0	0	799	0
21	0	814	0	0	1156	0	0	983	0	0	780	0	0	716	0	0	781	0
22	0	849	0	0	1118	0	0	998	0	0	747	0	0	723	0	0	794	0
23	0	868	0	0	993	0	0	986	0	0	741	0	0	820	0	0	869	0
24	0	965	0	0	990	0	0	1100	0	0	752	0	0	1168	0	0	1168	0
Diário	2188	22684	2188	2879	22844	2879	3508	20020	3508	3653	20502	3653	3792	19598	3792	3883	20840	3883
Mensal	65634	680505	65634	86383	685313	86383	105243	600585	105243	109579	615045	109579	113770	587940	113770	116501	625208	116501

Anexo V

Autoconsumo fotovoltaico (julho a dezembro de 2014) – Cenário Base																		
Horas	Julho			Agosto			Setembro			Outubro			Novembro			Dezembro		
	Pac	Consumo	Autoconsumo	Pac	Consumo	Autoconsumo	Pac	Consumo	Autoconsumo	Pac	Consumo	Autoconsumo	Pac	Consumo	Autoconsumo	Pac	Consumo	Autoconsumo
1	0	1213	0	0	866	0	0	1009	0	0	559	0	0	1021	0	0	1093	0
2	0	1188	0	0	1122	0	0	1019	0	0	734	0	0	1019	0	0	1111	0
3	0	1090	0	0	1123	0	0	984	0	0	1054	0	0	973	0	0	1081	0
4	0	1119	0	0	1084	0	0	996	0	0	1020	0	0	923	0	0	1110	0
5	0	1094	0	0	1071	0	0	1007	0	0	952	0	0	913	0	0	1105	0
6	18	1065	18	7	1046	7	43	973	43	4	967	4	0	915	0	0	1058	0
7	75	1069	75	64	1027	64	159	853	159	103	963	103	18	920	18	9	1088	9
8	192	941	192	184	773	184	284	875	284	233	759	233	191	917	191	132	1113	132
9	311	760	311	309	576	309	389	938	389	332	533	332	275	738	275	237	770	237
10	409	798	409	413	573	413	461	553	461	400	570	400	332	536	332	291	720	291
11	477	779	477	484	583	484	497	535	497	434	619	434	360	576	360	318	728	318
12	512	785	512	521	600	521	497	540	497	434	615	434	360	553	360	318	768	318
13	513	793	513	522	582	522	461	546	461	401	599	401	332	565	332	292	799	292
14	480	837	480	488	634	488	392	808	392	335	602	335	277	583	277	239	781	239
15	415	832	415	419	651	419	290	983	290	238	662	238	195	571	195	159	761	159
16	320	810	320	319	655	319	167	1002	167	120	690	120	78	561	78	28	798	28
17	204	818	204	195	644	195	48	948	48	13	638	13	0	537	0	0	828	0
18	86	808	86	73	629	73	1	708	1	0	617	0	0	544	0	0	734	0
19	18	790	18	9	643	9	0	461	0	0	655	0	0	547	0	0	796	0
20	0	830	0	0	648	0	0	515	0	1	695	1	0	536	0	0	808	0
21	0	844	0	0	675	0	0	521	0	0	680	0	0	535	0	0	670	0
22	0	859	0	0	909	0	0	527	0	0	648	0	0	682	0	0	684	0
23	0	847	0	0	1082	0	0	1009	0	0	680	0	0	1020	0	0	908	0
24	0	1209	0	0	671	0	0	711	0	0	627	0	0	749	0	0	1109	0
Diário	4032	22177	4032	4007	18865	4007	3688	19018	3688	3049	17132	3049	2419	17431	2419	2024	21418	2024
Mensal	120968	665303	120968	120218	565943	120218	110655	570540	110655	91457	513968	91457	72561	522915	72561	60715	642548	60715

Anexo VI

Autoconsumo fotovoltaico (janeiro a junho de 2014) – Cenário Co-digestão																		
Horas	Janeiro			Fevereiro			Março			Abril			Maio			Junho		
	Pac	Consumo	Autoconsumo	Pac	Consumo	Autoconsumo	Pac	Consumo	Autoconsumo	Pac	Consumo	Autoconsumo	Pac	Consumo	Autoconsumo	Pac	Consumo	Autoconsumo
1	0	765	0	0	645	0	0	742	0	0	554	0	0	787	0	0	788	0
2	0	762	0	0	664	0	0	729	0	0	735	0	0	790	0	0	813	0
3	0	737	0	0	734	0	0	719	0	0	832	0	0	789	0	0	822	0
4	0	750	0	0	709	0	0	718	0	0	800	0	0	775	0	0	924	0
5	0	776	0	0	712	0	0	719	0	0	766	0	0	762	0	0	801	0
6	0	745	0	0	760	0	20	617	20	3	752	3	12	732	12	17	767	17
7	7	741	7	51	765	51	104	526	104	44	737	44	53	656	53	55	483	55
8	109	733	109	150	675	150	188	519	188	119	712	119	125	500	125	130	466	130
9	172	658	172	219	572	219	256	411	256	195	454	195	200	539	200	205	480	205
10	214	585	214	266	475	266	302	402	302	257	471	257	262	505	262	267	477	267
11	236	536	236	289	576	289	325	448	325	300	474	300	306	489	306	310	478	310
12	236	623	236	289	576	289	325	462	325	322	486	322	329	475	329	333	469	333
13	214	618	214	266	552	266	302	469	302	323	494	323	329	475	329	333	469	333
14	173	665	173	220	498	220	257	445	257	302	516	302	308	315	308	313	496	313
15	111	602	111	153	538	153	191	458	191	261	551	261	266	368	266	272	524	272
16	28	597	28	70	529	70	108	485	108	200	549	200	205	450	205	212	506	212
17	0	584	0	2	632	2	28	494	28	125	550	125	132	440	132	138	524	138
18	0	618	0	0	686	0	0	481	0	49	566	49	58	442	58	62	528	62
19	0	621	0	0	778	0	0	501	0	5	551	5	14	446	14	16	560	16
20	0	569	0	0	791	0	0	701	0	0	553	0	0	460	0	0	553	0
21	0	563	0	0	800	0	0	681	0	0	540	0	0	496	0	0	541	0
22	0	588	0	0	774	0	0	691	0	0	517	0	0	501	0	0	549	0
23	0	601	0	0	688	0	0	682	0	0	513	0	0	568	0	0	602	0
24	0	668	0	0	686	0	0	761	0	0	520	0	0	808	0	0	809	0
Diário	1501	15704	1501	1975	15814	1975	2406	13859	2406	2505	14193	2505	2601	13567	2601	2663	14427	2663
Mensal	45015	471105	45015	59246	474433	59246	72181	415778	72181	75155	425788	75155	78030	407024	78030	79902	432823	79902

Anexo VII

Autoconsumo fotovoltaico (julho a dezembro de 2014) – Cenário Co-digestão																		
Horas	Julho			Agosto			Setembro			Outubro			Novembro			Dezembro		
	Pac	Consumo	Autoconsumo	Pac	Consumo	Autoconsumo	Pac	Consumo	Autoconsumo	Pac	Consumo	Autoconsumo	Pac	Consumo	Autoconsumo	Pac	Consumo	Autoconsumo
1	0	840	0	0	599	0	0	699	0	0	387	0	0	707	0	0	756	0
2	0	822	0	0	777	0	0	705	0	0	508	0	0	705	0	0	769	0
3	0	755	0	0	777	0	0	681	0	0	729	0	0	674	0	0	748	0
4	0	775	0	0	750	0	0	690	0	0	706	0	0	639	0	0	768	0
5	0	757	0	0	741	0	0	697	0	0	659	0	0	632	0	0	765	0
6	13	737	13	5	724	5	30	673	30	3	669	3	0	633	0	0	732	0
7	52	740	52	44	711	44	109	591	109	71	666	71	12	637	12	6	753	6
8	132	652	132	126	535	126	195	606	195	160	525	160	131	635	131	91	770	91
9	213	526	213	212	398	212	267	649	267	228	369	228	189	511	189	162	533	162
10	280	553	280	283	397	283	316	382	316	274	395	274	228	371	228	200	498	200
11	327	539	327	332	404	332	341	370	341	297	429	297	247	399	247	218	504	218
12	351	543	351	357	416	357	341	373	341	298	425	298	247	383	247	218	532	218
13	352	549	352	358	403	358	316	378	316	275	414	275	228	391	228	200	553	200
14	330	579	330	335	439	335	269	560	269	230	417	230	190	404	190	164	541	164
15	285	576	285	288	451	288	199	680	199	164	458	164	134	395	134	109	527	109
16	220	561	220	218	453	218	114	693	114	83	477	83	53	388	53	20	552	20
17	140	566	140	134	446	134	33	656	33	9	442	9	0	371	0	0	573	0
18	59	560	59	50	435	50	1	490	1	0	427	0	0	377	0	0	508	0
19	13	547	13	6	445	6	0	319	0	0	453	0	0	378	0	0	551	0
20	0	575	0	0	449	0	0	356	0	0	481	0	0	371	0	0	559	0
21	0	584	0	0	467	0	0	361	0	0	471	0	0	370	0	0	464	0
22	0	594	0	0	629	0	0	365	0	0	448	0	0	472	0	0	473	0
23	0	586	0	0	749	0	0	699	0	0	471	0	0	706	0	0	628	0
24	0	837	0	0	465	0	0	492	0	0	434	0	0	519	0	0	768	0
Diário	2766	15353	2766	2748	13060	2748	2530	13166	2530	2091	11860	2091	1659	12067	1659	1388	14828	1388
Mensal	82966	460581	82966	82452	391795	82452	75893	394978	75893	62726	355813	62726	49766	362008	49766	41642	444828	41642